# L'AGRO REPORTER

L'ACTUALITÉ DU MONDE AGRONOMIQUE VUE PAR NOS SPÉCIALISTES LCA

PRINCIPES AGRONOMIQUES ET BIOLOGIE DES SOLS

Page 1

VIGNE ET VIN

Page 54

PHYSIOLOGIE ET NUTRITION VEGETALE

Page 67

AMENDEMENTS ORGANIQUES ET SUPPORTS DE CULTURE

Page 77

METHANISATION

Page 103

EAUX ET DECHETS

Page 109

QUALITE SANITAIRE

Page 130

TECHNIQUE DE LABORATOIRE

Page 148

RELATION CLIENT AU LABORATOIRE LCA

Page 158


EDITION COMPLETE

L'AGRO reporter

# SOMMAIRE > ÉDITION COMPLÈTE

## PRINCIPES AGRONOMIQUES ET BIOLOGIE DES SOLS

### 1.1 MILIEU PHYSIQUE : TEXTURE, STRUCTURE, PIERROSITÉ


- *Toucher terre* .....P1
- *Pierres qui roulent* ..... .....P5
- *Le fer à dix sous* .....P8
- *Un minimum d'aluminium* .....P10


### 1.2 FERTILITÉ CHIMIQUE, ÉLÉMENT PAR ÉLÉMENT


- *L'azote : la zone ?* .....P13
- *Les reliques de l'azote* .....P15
- *La méthode du bilan azoté* .....P17
- *L'agronome et le phosphore* .....P22
- *Un K particulier* .....P25
- *Magnétique magnésium* .....P27
- *Chronique calcique* .....P30


### 1.3 STATUT ACIDO-BASIQUE


- *Chronique basique* .....P31
- *Duo de pH au menu* .....P33
- *Vers de nouvelles bases* .....P35


### 1.4 MATIÈRE ORGANIQUE DES SOLS ET FERTILITÉ BIOLOGIQUE


- *Le poids des M.O.*.....P36
- *L'histoire du sol en quelques MO*.....P38
- *Qu'il est bio mon indice d'activité biologique*P40
- *La biomasse microbienne* .....P41
- *Quand la biomasse s'éveillera*.....P42
- *Que faire de la Rhizosphère ?* .....P43


### 1.5 LECTURE TRANSVERSALE D'UN RAPPORT D'ANALYSE DE TERRE


- *Lire dans les lignes de la terre* .....P45

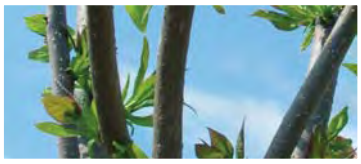

### 1.6 THÉMATIQUES SPÉCIALES


- Sols salés, sécheresse et irrigation :
  - *Les sols salés*.....P47
  - *Sécheresse : quelques pistes pour* ...P48 *réduire son impact en agriculture*
  - *Irrigation en clef de sel* .....P49
- Trufficulture : *Subtile et capricieuse la truffe* P51
- Espaces verts : *L'en vert du décor* .....P52
- Bananier *: tout a une fin sauf la banane qui en a deux*.....P53


## VIGNE ET VIN

- Intro : *Le vin est la réponse de la terre au soleil* ...P54
- Prélèvement : *Gros plan sur le prélèvement en vigne* .....P55
- Millesime 2013 : *faits d'hivers et de printemps*.....P57
- L'azote et la vigne *« VIE + N = VIN* .....P58
- Choix du porte greffe : *un art et des méthodes* ....P62
- Composition du moût : *Coup de moût* .....P63
- Réglementation applicable aux effluents vinicoles : *De l'eau dans le vin* .....P65
- Pépinière viticole : *Recherche virus* .....P66


## PHYSIOLOGIE ET NUTRITION VEGETALE




- *Fertiplante : un nouvel outil d'interprétation du végétal* ...P67
- La mise en réserve : *Apoptose automnale* .....P68
- Interprétation de l'analyse foliaire : *Prends garde à la couleur des feuilles*.....P70
- Engrais foliaires *: mythe ou réalité* .....P72
- Nutrition, les macro et micro éléments :.....P73 *nutrition il n'y a pas de second rôle*


## AMENDEMENT ORGANIQUES ET SUPPORTS DE CULTURE

### 4. 1 RÉGIME DES ICPE : DÉCLARATION, ENREGISTREMENT, AUTORISATION


- *Qu'avez-vous à déclarer ?* .....P77
- *Vol ICPE 2780 : enregistrement en cours* .....P79


### 4.2 AMENDEMENTS ORGANIQUES : VALEUR AGRONOMIQUE ET INNOCUITÉ


- Matière organique : *La matière organique* .....P81 *ne fait pas (toujours) l'amendement*
- *Actualité Phosphore des composts de miates* .....P82
- Stabilité de la matière organique :
  - Mesure de l'ISMO : *ISMO good* .....P83
  - Cinétique de minéralisation : *Les PRO font leur CINEma* .....P85
- Eléments inertes et indésirables :
  - Analyse : *Inerte et indésirable* .....P88
  - Matières organiques non synthétiques : ..P89 *MONS, ou comment séparer le bon grain de l'ivraie*
- Eléments traces :
  - ETM : *Compost vert : j'ETM,un peu*.....P90
  - Micro polluants organiques : *la traque aux traces organiques*.....P93


### 4.3 SUPPORTS DE CULTURE


- pH et conductivité électrique.....P96
- Caractérisation physique : *Le poinçonneur des substrats*P97
- Fertilisation organique des substrats.....P99


### 4.4 ECHANTILLONNAGE


- Bonne pioche.....P101


## METHANISATION

- *LCA, partenaire impliqué dans la méthanisation* ..P103
- *Evolution de la réglementation ICPE : installations de méthanisation*.....P104
- Mesure du potentiel méthanogène.....P105
- Acides gras volatils : *Digérer c'est prévoir*.....P107

L'AGRO reporter

# SOMMAIRE

ÉDITION COMPLÈTE

## EAU ET DECHETS

6.1 EAUX

- Format d'échanges SANDRE : *Edilabo ou la pêche au SANDRE* ..... P109
- Pratique du prélèvement des eaux :
  - *Rob'eaux scope* ..... P110
  - *Le débit de l'eau* ..... P111
- Eaux des plateformes de compostage :
  - *RSDE : plateformes de compostage* .. P113
  - *ô rage , eaux compostage* ..... P113
- Potabilisation et eaux d'abreuvement:
  - Désinfection de l'eau : *Histoire d'Eau* P114
  - Qualité des eaux d'abreuvement : *Le bec dans l'eau* ..... P116
- Procédés de traitement des eaux résiduaires :
  - Production de boues : *Les boues STEP by STEP...* . P117
  - Filtres plantés de roseaux : *Roseausphère.* P119
  - Technologie membranaire ..... P120

6.2 DÉCHETS

- Boues non épandables : *Boue taboue* ..... P122
- Tri mécano-biologique des déchets : TMB *Le mécano des temps modernes* ..... P124
- Sédiments : *Dragage et après ?* ..... P125
- Déchets : conseil de classe et d'orientation ..... P127


## QUALITE SANITAIRE

7.1 MICROBIOLOGIE

- Introduction : *Le microbe n'est rien, le terrain est tout (Louis Pasteur)* ..... P130
- Germes indicateurs de traitement : *Les bactéries nous parlent* ..... P131
- Microorganismes pathogènes
  - Salmonella et Listeria : *Les bactéries dans le Petri* ..... P132
  - Œufs d'helminthes : *La chasse aux oeufs* ..... P133
- Recherche et dénombrement : *microbiologie le compte est bon* ..... P134
- Resistance des microorganismes dans l'environnement : *microbes l'été meurtrier* ..... P135

7.2 PHYTODIAGNOSTIC

- Introduction : *Organismes pathogènes des plantes* . P136
- Technique ELISA : *ELISA* ..... P138
- Virose de la vigne, *Elisa mène l'enquête* ..... P139
- Maladies virales des plantes : *Des phytovirus au Louvre* ..... P140
- Virus et sélection clonale : *Vitis vitifera, ou l'effet papillon* ..... P141
- PCR : *le gène de la PCR* ..... P143

7.3 RÉSIDUS DE PRODUITS PHYTOSANITAIRES

- Introduction : *Phytoreporter* ..... P145
- Définitions : *LMR, ARjD, DJA et les autres* ..... P147


## TECHNIQUE DE LABORATOIRE

8.1 ANALYSE DES ÉLÉMENTS MINÉRAUX TOTAUX (ETM, ...)

- *Les particules élémentaires* ..... P148
- *Spécial technique analytique : les atomes à la masse* .. P149

8.2 ANALYSE DES COMPOSÉS ORGANIQUES (HAP, PCB, ...)

- *Le dosage MPO : qui fait quoi ?* ..... P150
- Composés organohalogénés :
  - *Dossier classé X* ..... P151
- Hydrocarbures : le vrai visage des fossiles ..... P153

8.3 LA COLORIMÉTRIE

- *Technique de laboratoire : la colorimétrie* ..... P155

8.4 MÉTROLOGIE

- *Mesurer c'est comparer* ..... P156

8.5 COMPARAISON INTER-LABORATOIRES

- *Comparaison inter-laboratoires* ..... P157


## RELATION CLIENT AU LCA

9.1 LOGISTIQUE, FOURNITURES

- *In the box* ..... P158

9.2 REVUE DE CONTRATS ET DES DEMANDES

- *Ad Libidum « conformément à la volonté de la personne »* ..... P159

9.3 RAPPORT D'ANALYSES ET WIKI REPORT LCA

- *Bien rapporter* ..... P160

9.4 NORMALISATION FRANÇAISE

- *AFNOR mode d'emploi* ..... P161

9.5 GESTION DES RÉCLAMATIONS

- *Dans Réclamation il y'a Relation* ..... P162

9.6 SERVICES

- *Le Crédit impôt recherche* ..... P163

# PRINCIPES AGRONOMIQUES ET BIOLOGIE DES SOLS

L'AGRO Reporter

EDITION COMPLETE

# TOUCHER TERRE

*Publié le 16 février 2012*

Il peut paraître paradoxal de parler de fertilité « physique ». Elle est pourtant, avec les composantes chimique et biologique, l'une des bases du triptyque sur lequel repose la fertilité des sols. Comment des composants, minéraux et supposés inertes par nature, peuvent-ils conditionner le potentiel agricole d'une parcelle ?

**Ne pas confondre texture et structure**

Les propriétés physiques des sols dépendent naturellement des proportions relatives des éléments les constituant, mais aussi de la façon dont ces éléments sont associés entre eux pour former des unités structurales. On appelle texture la composition d'un sol en sables, limons et argile. Elle permet de positionner les sols dans des « classes », dans lesquelles on associe parfois la matière organique et le calcaire lorsque leur présence est supérieure à 4 ou 5 %. La texture du sol classe donc les éléments constitutifs du sol selon leur dimension. Elle se distingue de la structure qui qualifie la disposition de ces éléments, en agrégats ou en unités structurales. Ces deux notions, texture et structure, commandent la totalité des caractéristiques physiques des sols, entre autres la porosité et le comportement des sols vis-à-vis de l'eau et de l'air.

**Appréciation et mesure de la texture d'un sol**

Sur le terrain, lors de l'examen du profil cultural par exemple, on peut, avec un peu d'expérience, apprécier la texture au toucher. Appliquée avec rigueur et méthode, elle permet d'aboutir à une véritable classification des sols.

| TEST | RÉSULTAT | CONSÉQUENCE SUR LA TEXTURE |
|---|---|---|
| Toucher de la terre sèche | Soyeux ou talqueux | Abondance de limons fins |
| | Savonneux | Abondance de limons grossiers |
| | Rugueux | Sables grossiers |
| Réalisation d'un boudin de terre humide | Possible | Argile >10 % |
| | Impossible | Argile <10 % |
| Réalisation d'un anneau avec le boudin de terre | Fissuration avant 1/2 fermeture de l'anneau | Limons > Argile Argile<30 % |
| | Fissuration au 3/4 de la fermeture | Limons < Argile Argile <30 % |
| | Anneau réalisable | Argile >30 % |
| D'après A. Fleury et B. Fournier, INA P.G. | | |

Malgré tout, on comprend que la perception manuelle pourra être différente d'une personne à l'autre. L'appréciation texturale est donc le plus souvent le résultat d'une mesure en laboratoire, plus reproductible et plus discriminante, par l'analyse granulométrique, une fois les graviers et cailloux éliminés par un tamisage à 2 mm. La totalité des analyses est effectuée, normativement, sur la « terre fine », dont les éléments ont moins de 2 mm de diamètre.

Pour les sols caillouteux, il est utile de demander au laboratoire de mesurer le « refus à 2 mm », afin d'apprécier la représentativité de la mesure sur la terre fine par rapport au volume total de sol exploitable ! En effet, sur certains sols viticoles par exemple, la terre fine peut représenter moins de 20% du volume du sol exploité par les racines. De la même façon que la bonne interprétation d'une analyse de sol nécessite la connaissance de la profondeur de la couche arable (sol utile), la prise en compte des refus (mais aussi du pourcentage de cailloux non mis dans l'échantillon à analyser, mais à indiquer sur la fiche de renseignements) est indispensable. Les éléments grossiers interviennent directement sur la porosité, la capacité de rétention hydrique et minérale, la vitesse de réchauffement et la résistance au tassement des sols.

Les constituants minéraux de la terre fine sont groupés par classes de dimensions selon les limites conventionnelles suivantes :

- Argile : 0 à 2 micromètres (soit moins de 0,002 mm)
- Limon fin : 2 à 20 micromètres (soit 0,002 à 0,02 mm)
- Limon grossier : 20 à 50 micromètres (soit 0,02 à 0,05 mm)
- Sable fin : 50 à 200 micromètres (soit 0,05 à 0,2 mm)
- Sable grossier : 200 à 2 000 micromètres (soit 0,2 à 2 mm)

Selon les nomenclatures, les limons fins sont parfois appelés « limons», et les limons grossiers qualifiés de « sables très fins ». Dans le système international, on ne trouve que 4 classes (0 – 2 – 20 – 200 – 2000 micromètres), les sables fins correspondant à 20 – 200 micromètres.

## L'ANALYSE GRANULOMÉTRIQUE AU LABORATOIRE

La méthode la plus fréquemment utilisée en France est la méthode normalisée NF X31-107. Après destruction de la matière organique en milieu liquide, qui aura été préalablement quantifiée, on laisse l'échantillon se « sédimenter ». Selon le principe de la Loi de Stokes, la vitesse de chute des particules dépend de leur taille. Les fractions fines sont déterminées après pipetages effectués à des profondeurs et des temps donnés dans l'échantillon, tandis que les fractions grossières sont obtenues après tamisage. Comme l'exige la norme NF X31-107, les résultats d'analyses sont exprimés de telle façon que la somme des fractions minérales soit égale à 1000.

## ARGILE VRAIE OU ARGILE GRANULOMÉTRIQUE

Selon les laboratoires, l'analyse granulométrique peut être effectuée avec ou sans décarbonatation préalable. Derrière ce qui peut passer pour un détail technique, se cache la plupart du temps le souci d'accéder, **par l'analyse granulométrique aux argiles « vraies » ou minéralogiques**, dont le rôle est fondamental dans les propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol.

Or la méthode d'analyse de la granulométrie étant basée sur la taille des particules constitutives, la classe des argiles va rassembler tous les éléments d'un diamètre inférieur à 2 micromètres : il s'agit **d'argiles granulométriques.** On y trouve les argiles minéralogiques (issues de l'altération des silicates), mais aussi : des débris de quartz très fins (1 à 2 micromètres), de la silice plus ou moins hydratée, des oxydes de fer et d'aluminium et des cristaux de calcaire très fins (moins de 2 micromètres).

L'étape préalable de décarbonatation, lorsqu'elle est réalisée par le laboratoire, aboutit à l'élimination du calcaire. De ce fait elle permet de se rapprocher de la proportion d'argile minéralogique dans la fraction inférieure à 2 micromètres, mais elle ne suffit pas à déterminer uniquement les argiles « vraies » : le quartz, la silice, les oxydes restent comptabilisés avec les argiles.

D'autre part, en fonction du type de sol, les carbonates peuvent aussi se trouver dans les fractions plus grossières. L'ensemble des résultats de l'analyse granulométrique peut donc être modifiée par la décarbonatation, sans qu'il soit possible d'en prévoir l'effet sur chaque fraction granulométrique prise séparément. En fait, la granulométrie après décarbonatation présente un intérêt dans deux cas particuliers précis :

> pour résoudre certains problèmes de **filiation pédogénétique** entre horizons, qui intéressent les pédologues ;

[...]

[...]
> pour connaître la **répartition granulométrique des carbonates dans un horizon calcaire** (à condition d'avoir aussi réalisé l'analyse sans décarbonatation). Cette approche peut intéresser les agronomes qui cherchent à évaluer la « réactivité » du calcaire, notamment dans des situations de risque de chlorose ou de choix de porte-greffe. Il faut souligner que le dosage du calcaire actif semble bien corrélé aux taux de carbonates des fractions granulométriques inférieures à 20 micromètres (argiles et limons fins), sauf pour les sols crayeux. Ce dosage complète utilement l'analyse granulométrique en l'absence de décarbonatation, pour les sols calcaires. C'est l'approche retenue par le LCA.

Comme la quantité et la nature des argiles minéralogiques jouent un rôle important dans la capacité d'échange des sols, la mesure de la Capacité d'Echange Cationique (CEC) est une détermination complémentaire particulièrement importante pour l'interprétation de l'analyse chimique de sol (bilan de fertilité). Deux sols ayant la même proportion d'argile granulométrique et de matières organiques peuvent en effet présenter des CEC très différentes selon la nature et la qualité de ces argiles et matières organiques.

## DE L'ANALYSE GRANULOMÉTRIQUE À LA TEXTURE

La proportion relative des différentes classes granulométriques définit la texture du sol. Les classes de texture sont généralement données dans des diagrammes triangulaires, équilatéraux ou rectangles, divisés en zones de texture déterminée. Différents diagrammes ont été proposés. Ils réduisent les compositions granulométriques à trois fractions (argile, limon, sable) dont la somme fait 100 %. Le principe est toujours le même : on positionne la composition granulométrique selon 2 des 3 fractions. La troisième est forcément égale au complément de la somme des deux premières à 100 %. Par exemple, pour un sol à 35 % d'argile et à 50 % de limon, la proportion de sable est égale à 15 % car [100 – (35 + 50] = 15.

Parmi les référentiels existants, on peut citer le diagramme USDA (12 classes), le diagramme FAO-UNESCO (3 classes), le diagramme belge (7 classes), ainsi que les triangles anglais (11 classes), suisse (10 classes), néerlandais (10 classes), ISSS (12 classes), etc.

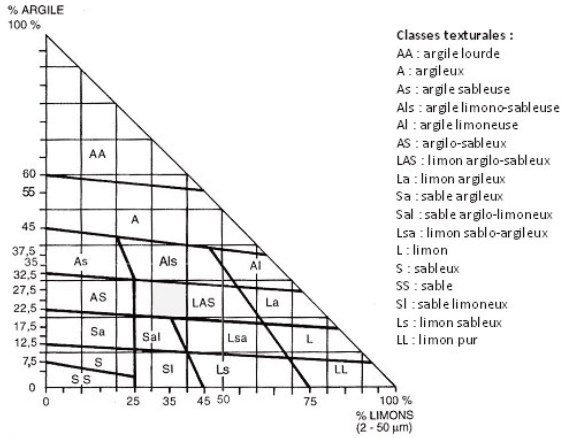
## EN FRANCE, DEUX DIAGRAMMES SONT COURAMMENT UTILISÉS

- celui du Service de la carte des sols de l'Aisne, qui comporte aujourd'hui 15 classes. A l'origine il ne comportait « que » 14 classes, les limons sableux et les limons moyens sableux n'étant pas distingués. Des versions simplifiées ont été proposées pour les « séries de sols » (9 classes) et les « familles de sols » (6 classes).

- celui du GEPPA (1963), qui comporte 17 classes. Elaboré par un groupe de pédologues à partir des sensations tactiles ressenties sur des prélèvements en provenance de tout le territoire métropolitain, il est devenu le standard français car reconnu comme le seul à émaner d'un travail collectif. C'est le triangle utilisé au LCA.

Il ne faut pas perdre de vue l'objectif recherché par les concepteurs de ces triangles, et le contexte dans lequel ils sont apparus. Ainsi, le diagramme de la FAO, est en fait un référentiel d'aptitude à la création d'étangs piscicoles, ce qui explique qu'il puisse se satisfaire de « seulement » trois classes. Dans d'autres situations, les triangles cherchent à apprécier les aptitudes à l'irrigation, servent de base au raisonnement du chaulage (USA, UK), à l'évaluation de la réserve utile ou en hydrologie.






**Triangle du GEPPA (1963)**
Source : BAIZE D., 1995. Guide pour la description des sols, INRA Editions.
** GEPPA : Groupe d'Etude pour les Problèmes de Pédologie Appliquée*

Certains triangles développent plus ou moins les textures de sols les plus répandus dans leur région d'origine (pour mieux distinguer les séries de sols) : c'est le cas du triangle roumain qui présente une forte différenciation des classes vers le pôle sableux. De même, on comprend la difficulté pour les agronomes des pays d'Afrique du Nord aux sols souvent extrêmes (très argileux ou très sableux) de travailler avec un triangle de texture européen, centré sur les sols limoneux.
Pour aller plus loin sur ce sujet, nous vous recommandons la lecture de l'article de A. Richer de Forges (Perdus dans le triangle des textures, 2008).

Finalement, sauf exigence de normalisation, que l'on utilise un triangle de textures existant ou que l'on en crée un autre pour ses propres besoins n'a guère d'importance. L'essentiel est de travailler avec un outil correspondant à ses objectifs. Il est assez fréquent, par exemple, que certaines structures ou organisations demandent au laboratoire de construire pour elles des diagrammes de textures spécifiques, centrés sur leurs sols dominants, pour mieux caractériser leurs parcelles.
En revanche, du fait des nombreux diagrammes existants, et du risque d'erreur lors du passage d'un référentiel à l'autre, il faut bien préciser la source utilisée : triangle référencé ou triangle spécifique.

La texture issue des diagrammes est une première classification des sols. Elle est forcément un peu réductrice par rapport à l'information obtenue par l'analyse granulométrique, qui comporte cinq classes de fractions, la matière organique et éventuellement le calcaire. Ces informations sont valorisables autrement, par le calcul de divers indices qui permettent d'évaluer la porosité, le risque de battance, etc.

## ET LA STRUCTURE ?

Les éléments constituants du sol sont, sur le terrain, plus ou moins intimement associés pour former des **agrégats**, dans la composition desquels entre également une partie de la matière organique. Ces agrégats peuvent eux-mêmes être associés en **unités structurales** de plus grande taille pour constituer la structure du sol. De cette organisation va dépendre la circulation de l'eau et de l'air dans le sol et donc la vie végétale.

La structure n'est pas une constante : elle varie dans le temps, avec les saisons, les conditions climatiques et hydriques et sous l'effet de la culture. Le principal facteur de destructuration des sols est l'eau. Selon sa résistance à ces différents paramètres, le sol est qualifié de « stable » ou « instable ».

Cette stabilité est liée à de nombreux paramètres, dont :

- la présence de colloïdes et leur cimentation, dans lesquels l'argile, la matière organique et les oxydes de fer et d'aluminium jouent un rôle important ;

- la quantité, la fonctionnalité et le type de matière organique du sol ;

[...]

[...]
- la « couverture cationique » du sol, et notamment la présence excessive de sodium, magnésium ou potassium (facteurs d'instabilité sur les sols sensibles). A contrario, le calcium a un effet stabilisant (les sols basiques sont toujours plus stables que les sols acides) ;

- la mise en culture du sol, qui a souvent tendance à dégrader la structure du sol si les techniques choisies ne sont pas appropriées : choix des outils de travail du sol, gestion des amendements calciques ou organiques, type d'engrais… C'est à ce niveau qu'intervient, en grandes cultures, le choix de techniques cultures simplifiées (TCS), de non labour ou de semis direct.

La structure n'est pas une valeur mesurable mais s'apprécie, sur le terrain, par l'observation des profils culturaux ou pédologiques. On distingue plusieurs types de structure (particulaire, massive, fragmentaire…) selon la dimension des unités structurales, leur forme, leur cohésion…

*Coupe de sol à Châteauneuf du Pape (Photo : K. Riman)*

L'échantillon de terre transmis au laboratoire, remanié, est par nature déstructuré et ne permet donc pas de déterminer la structure du sol. Par contre, de nombreux outils analytiques ou critères permettent d'en estimer la stabilité et d'apprécier les risques d'accidents ou de difficultés (contraintes) agronomiques.

**Le comportement agronomique d'un sol dépend en grande partie de sa texture, selon des relations complexes car liées à de nombreux paramètres (composition, climat, nature du végétal cultivé, mode de conduite…). C'est le rêve de tout « agronome – chercheur » de modéliser les relations entre la granulométrie et le comportement global du sol (réserve en eau, battance, aptitude à la fissuration…).**

De telles relations se présentent le plus souvent sous la forme d'équations de régressions multiples. Heureusement leur utilisation est facilitée par une représentation graphique, prenant généralement la forme de triangles dont les sommets sont formés par les argiles, limons et sables. Ces triangles ou ces équations servent de base pour interpréter les résultats d'analyses granulométriques de terre et apporter des informations sur la fertilité physique des sols à partir d'une analyse de laboratoire.

## DES TRIANGLES…

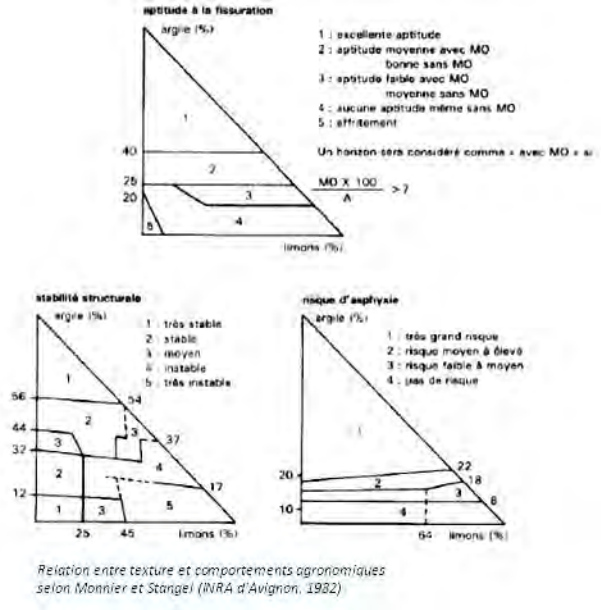
La connaissance des trois grandes classes granulométriques permet d'accéder à certains comportements d'un sol :

**> Aptitude à la fissuration.** Indicatrice de la capacité d'un sol à se restructurer naturellement sous l'effet du climat, elle traduit l'intensité des mécanismes de division du sol par des alternances de phases de gonflement et de retrait sous l'effet de variations d'humidité (humectation et dessiccation). L'aptitude à la fissuration dépend en particulier des teneurs en argile et en matière organique (MO). L'argile augmente l'aptitude à la fissuration, mais la MO modifie les propriétés du sol : si le ratio MO/Argile est supérieur à 7%, on considère l'aptitude à la fissuration comme diminuée.

**> Stabilité structurale**. La « cimentation » des agrégats du sol est assurée en partie par les argiles (mais surtout par la matière organique : cf Toucher Terre Partie 2/3). La présence d'argile aura donc tendance à augmenter la stabilité structurale. Mais la relation entre texture et stabilité est complexe : les sols les plus stables sont les sols très argileux, ou au contraire très sableux (insensibles à l'action de l'eau). A l'inverse, la prédominance des limons est facteur d'instabilité.

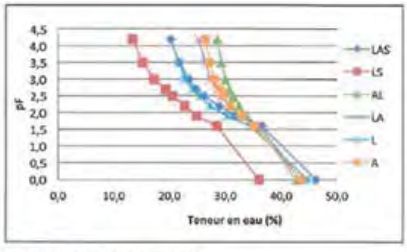
**> Risque d'asphyxie**. Il est lié à la porosité du sol, ces espaces non occupés par les particules solides du sol, qui permettent l'aération du sol, la circulation de l'eau et régulent l'intensité du lessivage. La texture, qui influence la microporosité, a un rôle à jouer. Ainsi les sols de texture fine présentent-ils un risque d'asphyxie supérieur aux sols plus grossiers. Le « poids » de la texture est modulé par la structure du sol (dont dépend la macroporosité) et par l'humidité du sol.

Sur les sols qui présentent des risques d'asphyxie élevés, toute intervention visant à lutter contre l'excès d'eau ou à améliorer la structure (drainage, apport d'amendements calciques et organiques, nature du travail mécanique …) aura un effet bénéfique.




*Relation entre texture et comportements agronomiques selon Monnier et Stengel (INRA d'Avignon, 1982)*

**> Capacité de rétention en eau des sols**. Dans les régions qui connaissent des épisodes de sécheresse prolongée, l'eau constitue rapidement le premier facteur limitant de la production et il est impératif de pouvoir estimer la réserve en eau des sols. Des relations entre les propriétés hydriques des sols et leurs caractéristiques physiques ont pu être décrites et différents modèles, ou « fonctions de pédo-transfert », sont disponibles. La capacité de rétention en eau des sols, déduite de la forme des courbes de pFI d'échantillons de terre, est ainsi dépendante à la fois de leur texture et de leur structure. Il faut souligner que l'utilisation d'échantillons remaniés par les laboratoires, qui travaillent le plus souvent sur des terres tamisées à 2 mm et donc déstructurées, modifie l'allure de ces courbes. Ces fonctions de pédo-transfert présentent un grand intérêt, à condition de les utiliser dans les régions dans lesquelles elles ont été établies, surtout si elles ont pu être établies sur des sols non remaniés, à l'image des travaux récents menés en Algérie par Dridi et Dilmi (2011).




*Courbes de rétention en eau de sols non remaniés selon leur texture (Dridi et Dilmi, 2011)*

[...]

[...]

## QUELQUES INDICES

La détermination des cinq classes granulométriques permet d'aller encore plus loin dans l'utilisation des résultats d'analyses par le calcul de divers indices.

Ainsi l'indice d'instabilité structurale des agrégats de Hénin est établi à partir des teneurs en argile, limons fins, sables grossiers et en agrégats :

**Is = [Argile + Limon fin] / [Agrégats – 0,9 * Sable grossier]**

Cet indice varie globalement de 0,1 à 100, ce qui correspond à des stabilités structurales respectivement très élevées et très faibles. Plus l'indice d'instabilité est élevé et plus le sol a tendance à se désagréger et à se colmater sous l'effet de la circulation de l'eau, ce qui réduit la vitesse d'infiltration, si bien que ces deux paramètres varient en sens inverse l'un de l'autre. Néanmoins, l'appréciation des quantités d'agrégats n'est pas une analyse de routine dans les laboratoires agronomiques. Ainsi, en pratique, cet indice est rarement utilisé pour les analyses agricoles, qui s'appuient davantage sur l'indice de battance.

La formule d'estimation des risques de battance, proposée initialement par Rémy et Marin-Laflèche en 1974, est bien corrélée avec les résultats des tests de stabilité de Hénin. Dans sa dernière version, utilisée au LCA, elle s'écrit : **IB = [1,5 * Limon fin + 0,75 * Limon grossier] / [Argile + 10 * Matière organique] – CII**

**L'indice de battance (IB)** s'applique aux horizons de surface. Plus la valeur de l'IB est élevée, plus le risque de battance est important. Les sols sont considérés comme peu ou non battants pour des valeurs d'IB inférieures à 1,4 à 1,6 et battants à très battants si cet indice est supérieur à 1,6 ou 1,8.

On comprend bien que, pour un sol de composition granulométrique donnée, l'indice de battance diminue avec une augmentation de la teneur en matière organique de la couche de sol travaillée. De fait, les techniques qui conduisent à un enrichissement relatif de la couche superficielle du sol en matière organique (non labour, maintien des résidus de cultures en surface, engrais verts, …) peuvent contribuer à limiter la sensibilité du sol à la battance. Comme l'illustre la figure suivante, une différence sur la teneur en MO du sol de 0,5%, pour une composition granulométrique donnée, suffit à faire passer un sol limoneux de « peu battant » à « assez battant ». Ainsi l'entretien organique des sols revêt une importante particulière lorsqu'on observe que le risque de battance devient problématique à moins de 2% de MO sur ces mêmes sols.

## PRINCIPE DE RELATIVITÉ

D'une façon générale, il ne faut pas se fier à un seul indice ou ratio, forcément réducteur, mais les confronter entre eux. Garder présents à l'esprit les quelques points suivants permettra de conserver le recul nécessaire à l'interprétation des résultats d'analyses :

> La nature minéralogique des argiles présentes dans le sol est un facteur essentiel de son aptitude à la fissuration ; par exemple, la montmorillonite a un fort pouvoir de gonflement, contrairement à la kaolinite. A ce niveau intervient aussi la différence entre les argiles granulométriques et les argiles « vraies »

> La répartition des éléments dans les classes granulométriques n'est pas forcément linéaire. La classe des « sables fins » est à ce niveau particulièrement délicate. Ces particules se comportent souvent plus comme des limons, avec des risques de compactage et tassements, que comme des sables grossiers à forte porosité. C'est pour cela que certains modèles agronomiques peuvent distinguer plusieurs groupes dans cette classe.

> De même, la qualité et la fonctionnalité des matières organiques interviennent de façon prépondérante sur le comportement physique du sol. Les analyses spécifiques des matières organiques des sols, qui seront développées dans un prochain article, sont une des évolutions récentes de l'agronomie.

> Les comportements théoriques des sols s'exprimeront plus ou moins selon la quantité d'éléments grossiers dans le sol (graviers, cailloux). Il faut se souvenir que l'analyse de terre se fait après élimination des éléments supérieurs à 2 mm ! Ainsi, un sol très asphyxiant sur la terre fine peut être très drainant s'il possède 50% de refus.

> Un sol très asphyxiant par l'analyse peut être agronomiquement très intéressant s'il repose sur un sous-sol très drainant. A l'inverse un sol sableux, sans risque d'asphyxie a priori, peut être très difficile s'il est suivi d'une couche d'argile imperméable. La connaissance de la texture du sol, mais aussi du sous-sol, est essentielle pour le choix du porte greffe dans les cultures pérennes.

De nouveau, l'analyse de sol ne peut être pleinement valorisée que si elle est accompagnée d'une bonne connaissance de la parcelle.

*Bibliographie :*

*- Agro-Transfert R&T, Chambres d'Agriculture de Picardie, 2007. Mémento Sols et Matières Organiques. 50 p.*
*- D. Baize, 2000. Guide des analyses en pédologie. INRA Editions, 257 p.*
*- B. Dridi et A. Dilmi, 2011. Poids des différentes caractéristiques des sols dans l'estimation de leur rétention en eau. Etude et Gestion des Sols, 18, 4, 2011.*
*- Ministère de la Coopération, 1993. Mémento de l'Agronome, 4ème Edition. Collection « Techniques rurales en Afrique ». 1635 p.*
*- A.C. Richer de Forges et al, 2008. Perdus dans le triangle des textures. Etudes et Gestion des Sols, 15, 2, 2008.*
*- D. Soltner, 2003. Les bases de la production végétale. Tome 1 : le sol et son amélioration. Collection Sciences et Techniques Agricoles. 472 p.*

*I- Les courbes de pF sont des courbes d'humidité pondérale en fonction du potentiel matriciel de l'eau. Elles traduisent la force avec laquelle la terre ou le substrat retiennent l'eau lorsqu'ils sont soumis à des dépressions (succions) de plus en plus fortes.*
*II- « C » est un terme correctif à soustraire lorsque le pH est supérieur à 7, sous certaines conditions d'utilisation.*

# PIERRES QUI ROULENT *(PARTIE 1/2)*

*Publication du 31 janvier 2013*

D'un côté, les sols caillouteux représentent environ 40% des sols français. D'un autre côté, les analyses de sols en laboratoire s'effectuent normativement sur la terre fine (1) (c'est-à-dire sur les particules inférieures à 2mm , après préparation et broyage selon les normes NF X 31-101 et NF EN ISO 11464), et ignorent ces pierres, graviers et autres cailloux fantômes. Néanmoins, comme la profondeur de sol utile ou la nature du sous-sol, la connaissance de la pierrosité d'une parcelle est indispensable au conseiller pour interpréter et utiliser l'analyse. Intuitivement, on peut penser que, par exemple, un sol ayant 50% en volume d'éléments grossiers (supérieurs à 2mm) a un potentiel minéral et nutritif équivalent à un sol non caillouteux moitié moins profond. Pratiquement, l'approche est plus complexe, la présence de cailloux modifiant et, parfois, améliorant le fonctionnement du sol. Partant dans un premier temps des outils d'appréciation de la charge en cailloux, l'Agro Reporter va s'intéresser aux effets négatifs ou positifs de la pierrosité sur les sols et les plantes.

## POURQUOI ÉTUDIER LES ÉLÉMENTS GROSSIERS D'UN SOL ?

Dès que leur présence dans un sol est significative, les éléments grossiers vont avoir des effets agronomiques qu'il faudra prendre en compte :
> diminution de la réserve utile en eau du sol ou, au contraire, stockage d'eau,
> protection contre l'évapotranspiration,
> stockage d'énergie et réchauffement du sol,
> obstacle au développement racinaire,
> évolution plus rapide des matières organiques,
> maintien de la porosité du sol et protection contre le tassement…

Sol à 40% de cailloux faisant obstacle à une bonne levée du blé (81)

Techniquement, une charge trop importante en cailloux va entraîner des difficultés de semis et de récolte, elle va être un obstacle à la mécanisation et pour certaines cultures, obliger à un choix de matériel spécifique ou de méthodes culturales appropriées.

## APPRÉCIATION DE LA PIERROSITÉ

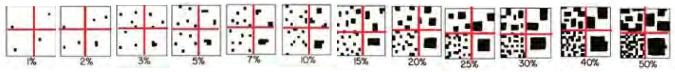
Plusieurs méthodes ont été décrites pour apprécier la pierrosité globale d'un sol, en volume ou en masse.

- La pesée au champ : cette méthode laborieuse consiste, à l'aide de tamis et de balance, et selon un plan statistique précis, à peser les éléments grossiers du sol et à ramener leur masse au poids total de la terre.

- La pesée des refus au laboratoire : cette mesure, qui consiste à peser les particules supérieures à 2mm de l'échantillon, se fait le plus souvent sur demande explicite et doit être complétée par l'estimation (en masse) des éléments les plus volumineux non prélevés. Il paraît nécessaire d'avoir cette information, invariante, au moins une fois dans l'historique analytique d'une parcelle. La seule connaissance des refus est déjà une information importante (surtout s'ils sont élevés) mais n'est pas suffisante en soi pour apprécier la pierrosité, dans la mesure où la répartition des cailloux ne suit pas forcément une loi statistique normale.

- Le comptage par points : on compte le nombre d'éléments grossiers à l'aide de grilles (proches de celles utilisées pour un comptage floristique) et on mesure leur taille. Il existe, là aussi, des méthodes statistiques spécifiques. On est ici sur une approche en volume.

- L'estimation visuelle : cette méthode, la plus fréquente, utilise des grilles d'estimation de la pierrosité du sol (identiques à celles utilisées pour l'appréciation de la couleur). On est là, également, sur une approche en volume. Ces grilles sont utilisables pour une étude de surface ou de profondeur (profil cultural). Sur le graphique ci-dessous chaque quart de carré a la même proportion, en surface, de cailloux mais pas le même nombre. L'appréciation de la taille des éléments grossiers est donc également importante pour le comportement du sol et des racines.




Grille d'estimation de la pierrosité du sol (d'après Revised Sandart soil Chart et David Hammonds)

En volume, expression recommandée par le GEPPA (Groupe d'Etude des Problèmes de Pédologie Appliquée), la quantité d'éléments grossiers est généralement décrite de la façon suivante :

| % de cailloux | Description |
|---|---|
| < à 5% | Peu d'éléments gr |
| de 5 à 15 % | Faible charge caillo |
| de 15 à 30 % | Charge caillouteus |

Cette information doit être complétée par une estimation de la taille des éléments grossiers, pour des conseils de mécanisation, par exemple. Plusieurs classifications existent. La plus courante (AFNOR X 31-003 1998) utilise la grille suivante :

| Diamètre des particules | Dénom |
|---|---|
| < à 2mm | Terre fi |
| de 2 mm à 2 cm | Gravier |
| de 2 cm à 7,5 cm | Caillou |
| de 7,5 cm à 12 cm | Pierres |

Dans l'étude du profil d'un sol, la description de la quantité et de la taille des éléments grossiers est effectuée pour chaque horizon. Deux sols identiques sur les 40 premiers centimètres n'auront en effet pas le même comportement s'ils reposent l'un sur un sous-sol de graviers et l'autre sur une couche argileuse.

## ESTIMATION DE LA DENSITÉ DES ÉLÉMENTS GROSSIERS

La densité apparente d'un sol varie de 1,0 à 1,6 g/cm3. Les cailloux ont une densité globalement comprise entre 2 et 3. La proportion de cailloux intervient donc directement sur les conseils ou les résultats d'analyses utilisant la densité, par exemple pour les reliquats azotés en grandes cultures.
Pour des études précises, notamment en horticulture et maraîchage ou en cas d'irrigation fertilisante, il sera nécessaire d'avoir une estimation de la charge en cailloux en masse et non plus seulement en volume, pour estimer cette densité.

## NATURE DES ÉLÉMENTS GROSSIERS ET COMPORTEMENT VIS-À-VIS DE L'EAU

Généralement, les éléments grossiers diminuent le potentiel hydrique du sol et limitent, en proportion de leur présence en volume, la réserve en eau, du fait de leur absence de porosité. Il y a, par contre, des exceptions, comme les craies ou des grès altérés qui possèdent une porosité parfois importante et « stockent » de l'eau. Dans les régions concernées (Vallée du Rhône, Champagne…), les Réserves Utiles d'un sol caillouteux peuvent être plus élevées que celles des sols non caillouteux. Certaines études ont enfin pu montrer que les cailloux poreux pouvaient jouer un rôle « tampon » en restituant de l'eau dans les phases de dessiccation du sol (Coutadeur et al, 2000).
La connaissance de la nature des cailloux présents dans un sol est donc également nécessaire à l'agronome.

## AUTRES INFORMATIONS UTILES

Le niveau d'évolution des cailloux, leur forme, leur dureté, la présence d'éclats coupants, leur sensibilité au gel, leur localisation en surface et en profondeur sont également des informations à collecter, pour une nouvelle parcelle ou l'implantation d'une culture de longue durée.

*On voit que l'étude des éléments grossiers du sol est à la frontière entre l'agronomie, la pédologie et la géologie.*

# PIERRES QUI ROULENT *(PARTIE 2/2)*

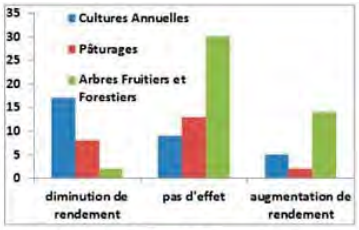
*Publication du 7 février 2013*

L'article du 31 janvier 2013 de l'Agro Reporter décrivait les outils d'appréciation de la charge en cailloux d'un sol. Une approche basée uniquement sur la terre fine apparaît en effet insuffisante et l'agronome et le technicien doivent tenir compte de la présence de cailloux pour apprécier un sol dans sa relation avec le climat et la plante.
Nous nous intéressons maintenant aux conséquences de la pierrosité. Si l'on perçoit bien les effets négatifs des cailloux, leurs éventuels effets positifs apparaissent moins évidents. Pourtant, déjà, Pline l'Ancien raconte qu'un laboureur de Syracuse ayant enlevé les pierres de son champ et, que rien ne pouvant plus y pousser, fut obligé de les remettre en place…

## CAILLOUX ET RENDEMENTS DES CULTURES

Il existe peu de comparaisons fiables entre les résultats d'une culture en sol caillouteux ou non caillouteux du fait des difficultés d'expérimentation sur site. Cette comparaison est d'autant plus difficile qu'elle va varier selon les espèces. D'une façon générale, les plantes pérennes sont beaucoup moins sensibles aux sols caillouteux (surtout si elles sont irriguées) que les prairies. Les plantes annuelles sont les plus sensibles du fait de difficultés d'installation. On comprend que, physiquement, une forte pierrosité est problématique pour des cultures de betteraves ou de carottes. De même, la présence d'éléments grossiers au sol peut rendre impossible la récolte mécanique (pomme de terre par exemple). La figure ci-dessous fait la synthèse d'un certain nombre d'essais sur le sujet (d'après R. GRAS -pub. INRA 1994).

## CAILLOUX ET TEMPÉRATURE DU SOL




*Synthèse d'essais sur l'influence de la pierrosité du sol sur les rendements, en effectif (d'après R. GRAS 1994)*

Les propriétés thermiques des cailloux sont différentes de celles de la terre fine. Il faut distinguer ici la conductivité thermique (capacité à conduire la chaleur), de la capacité thermique (capacité à accumuler la chaleur). Ces deux propriétés sont regroupées sous le terme de diffusivité thermique et vont varier en fonction de la nature des cailloux en place. Ainsi, en sol sec, une pierrosité élevée va augmenter les réactions thermiques du sol : plus forte sensibilité au réchauffement (dans la journée ou dans la saison) mais, à l'inverse, plus grande sensibilité au refroidissement (nocturne ou dans la saison). Cela constitue une des difficultés supplémentaires à la culture dans des zones désertiques ou semi désertiques où les amplitudes thermiques sont souvent très élevées, mais caractérise aussi certains terroirs viticoles.
Ce phénomène est beaucoup moins présent quand les pierres sont poreuses d'où l'importance, dans une étude de sol, de définir la nature des cailloux. Par ailleurs, il est atténué en sol faiblement ou normalement humide mais accentué en sol saturé en eau. Ainsi une étude précise de l'effet de la pierrosité sur le réchauffement du sol devient vite complexe puisqu'il faut tenir compte de la nature et proportion de cailloux, de la terre fine mais aussi de son niveau d'humidité.
A noter également que la présence de cailloux en surface du sol va changer les conditions de l'ambiance externe dans lesquelles va fonctionner la plante (températures, humidité, réverbérations…). Ce phénomène, caractérisant certains terroirs, est très connu et utilisé en plantes pérennes, avec une maturation différente des baies de raisin ou des écarts de précocité de coloration des pommes.

## CAILLOUX ET EAU DANS LE SOL

La pierrosité d'un sol améliore sa perméabilité et permet une meilleure pénétration de l'eau mais avec, en cas d'une forte présence superficielle de cailloux, une diminution de la surface utile d'humectation.

Le drainage est également augmenté ce qui, là aussi, peut être un atout dans les sols à risque de saturation en eau (base argileuse ou limoneuse) mais constitue une difficulté supplémentaire dans les sols grossiers à faible pouvoir tampon. De même, cet effet sera souvent positif en saisons humides mais négatif en périodes sèches. Ce critère sera important à prendre en compte pour le choix d'un système d'irrigation.

Les cailloux limitent aussi les flux d'eau capillaires dans le sol et il en résulte souvent, en été, une augmentation du niveau d'humidité de la terre fine en sol caillouteux. Pratiquement, il y a moins d'évaporation de surface en sol caillouteux du fait d'une meilleure infiltration de l'eau et de la couverture du sol par les cailloux. Par exemple, SAINI et Mc LEAN (1967) ont constaté que l'épierrage d'un sol à 8 % de pente diminue l'humidité du sol (voir graphique ci-dessous).

*Conséquences de l'épierrage sur l'humidité d'un sol à 8 % de pente. D'après SAINI et Mc LEAN (1967)*

Les cailloux poreux se comportent différemment dans le sol puisque leur capacité à stocker une certaine quantité d'eau va influencer leur impact hydrique.
On est ici sur des problèmes d'hydraulique, très complexes à analyser sur un milieu aussi hétérogène qu'un sol. Il est difficile d'apprécier, a priori, l'effet positif ou négatif des cailloux sur l'humidité d'un sol.

## CAILLOUX ET STRUCTURE DU SOL

L'effet positif ou négatif des cailloux sur l'amélioration de la structure du sol va dépendre de la proportion de cailloux et de la nature de la terre fine. Le comportement d'un sol à risques de faible porosité (possibilité de battance, de tassements, ….) sera amélioré par un certain niveau de pierrosité, via ses effets sur l'aération mécanique, la protection de la surface etc. On estime que, dans ce type de sol, hors espèces très sensibles aux cailloux, le rendement en culture non irriguée peut être amélioré jusqu'à 30 à 40% de cailloux et graviers puis diminue quand la pierrosité augmente. En cultures arbustives ferti-irriguées, on peut arriver à des valeurs très supérieures. Certaines zones (dans les Costières de Nîmes, par exemple) ne sont cultivables que grâce aux cailloux. Bien évidemment, la profondeur du sol, la richesse en matières organiques et la nature du sous-sol interviennent également.

La présence de cailloux protège également contre l'érosion et un épierrage intensif ou mal raisonné, dans les pays à forte pluviométrie ou dans les régions pentues, est un facteur de dégradation plus rapide des sols. De même, ce critère intervient dans le choix du type d'irrigation, les éléments grossiers en surface limitant l'impact, parfois violent et compactant, des gouttes d'eau sur le sol.

## CAILLOUX ET TRAVAIL DU SOL

La quantité de cailloux et leur agressivité obligent à adapter le travail du sol et les outils utilisés. L'épierrage ou le broyage, s'il est possible (pour les pierres tendres calcaires, mais avec le risque d'assécher le sol) sont fréquemment utilisés, mais représentent un coût significatif en cultures annuelles.

[…]

[…]

Andainage de cailloux avant ramassage (Maroc)

D'une façon générale, tout travail profond est à éviter (surtout de type sous-solage). On préfèrera les socs à lame et les outils à dents verticales (sauf pour l'enfouissement des pailles où les outils à disque semblent préférables). L'adaptation des semoirs est également nécessaire. La limite sera cependant l'usure du matériel (abrasion) et les coûts supplémentaires de protection du matériel.

## CAILLOUX ET MATIÈRES ORGANIQUES DU SOL

La pierrosité entraîne une dilution de la terre fine diminuant le potentiel minéral, hydrique mais aussi organique du sol, en termes de stock. Là aussi, les analyses de caractérisation du niveau et de l'état organique seront à moduler et interpréter en fonction de la proportion de cailloux.

Par ailleurs, l'influence de la charge en pierres sur les caractéristiques hydriques, thermiques et mécaniques du sol va également jouer sur le comportement de la faune et flore et sur la vitesse de dégradation des végétaux, des pailles notamment.

A niveau de terre fine équivalente, un éventuel apport de produits organiques sera donc à raisonner différemment sur sol caillouteux ou non (niveau, nature, fréquence…).

## CAILLOUX ET RACINES

L'impact des éléments grossiers sur les racines va être direct (lésions, obstacle au développement…) ou indirect (modification du contexte du sol). Les légumes tige, comme l'asperge, les bulbes, les légumes racines et les tubercules seront naturellement les plus sensibles aux agressions directes.

En plus du risque de non contact de la graine avec la terre fine, les cailloux peuvent pénaliser le développement des organes fragiles comme les coléoptiles et les racines séminales des céréales.

Le changement des conditions hydriques, d'aération et de température lié à la charge en cailloux influe également sur le développement et le fonctionnement radiculaire, de façon positive ou négative selon les cas.

Un autre effet évident, mais plus difficile à appréhender, est la consommation supplémentaire d'énergie par le végétal pour le développement des racines dans un sol comportant beaucoup d'obstacles physiques, au détriment de l'axe végétatif et de la production. Des racines plus « torturées » sont également moins performantes. Cet effet négatif sera d'autant plus important que le cycle de la culture est court.

Les éléments les plus grossiers du sol participent donc à la nutrition minérale et hydrique de la plante, parfois directement mais surtout indirectement en modifiant les conditions de milieu. La pierrosité est, comme la profondeur du sol ou la nature du sous-sol, un élément le plus souvent invariant de la parcelle cultivée et sa prise en compte, s'il y a lieu, est nécessaire pour bien valoriser les analyses de sol.

*L'équipe d'agronomes de LCA est à votre disposition pour répondre à vos questions et échanger sur ces problématiques.*

# LE FER À DIX SOUS

*Publié le 24 novembre 2011*

*Héphaïstos forgeant la foudre de Zeus par Rubens (1636-1638) Musée du Prado, Madrid*

La mythologie grecque ne se trompe pas quand elle réunit dans la figure divine d'Héphaïstos, le feu, la forge et les volcans. Le fer, cet élément courant de notre vie quotidienne, vient du cœur de la terre. Nous lui devons des découvertes capitales à l'origine de grandes avancées dans l'histoire humaine. Au Xème siècle avant notre ère, en Europe, l' « âge de fer » permet ainsi un développement de l'agriculture grâce à des techniques nouvelles : l'araire à soc de fer remplace l'araire en bois et permet de labourer plus profondément.

Nous le connaissons aussi comme oligo-élément, classé parmi les sels minéraux indispensables à notre alimentation (contre l'anémie par exemple). Mais il peut se révéler toxique sous certaines formes. On le voit, le fer est étroitement lié à la physiologie animale et végétale : on le retrouve aussi bien au centre du noyau de notre hémoglobine qu'au cœur du fonctionnement de la photosynthèse.

C'est enfin un excellent indicateur coloré utilisé par les pédologues pour apprécier l'état d'oxydation des sols. Ces nombreuses facettes du fer justifiaient bien deux numéros de l'Agro Reporter ! Dans cette première partie, nous nous intéresserons à la genèse du fer dans les sols agricoles.

## DUR COMME FER

Le fer est l'oligo-élément le plus abondant dans les sols. Quatrième élément en poids de l'écorce terrestre (environ 5 %), il vient après l'oxygène, le silicium et l'aluminium. Présent dans presque toutes les roches de surface, dans tous les sols, il constitue en grande partie le centre de la terre.En tant que minéral, le fer doit subir un ensemble complexe de processus (échange, hydrolyse, mise en solution, oxydation et réduction, absorption, chélation …) pour aboutir à la formation d'un sol.

On admet que les minéraux riches en fer doivent subir une décomposition complète en leurs différents constituants pour passer à l'état d'ions avant de se recombiner pour donner naissance aux minéraux du sol. L'eau est un agent primordial de ces opérations qui permettent le passage du fer à l'état de minéral au fer constituant du sol.

## INDICATEUR COLORÉ

Les modifications de l'état du fer, et notamment les teintes du sol induites par la présence de fer, constituent pour les agronomes et les pédologues un excellent indicateur de l'état d'aération du milieu. En milieu réducteur et pauvre en oxygène, le fer est bivalent (Fe++) sous la forme d'oxyde ferreux, d'hydroxyde ferreux, de carbonate ferreux ou de sulfure de fer.
Dans ces sols généralement asphyxiants par excès d'eau (sols hydromorphes), les oxydes ferreux se déposent en taches de gley caractéristiques de couleur gris vert ou gris bleuté.

*Sol à Gley*

En milieu aéré, le fer est trivalent (Fe+++) et prend la forme d'oxyde ferrique ou d'hydroxyde

**Coloration rouille de l'oxyde ferrique**

ferrique. Les colorations caractéristiques de ces milieux sont des teintes rouille du fer oxydé Fe2O3.

## LE FER SOUS TOUTES SES FORMES

Dans le sol, le fer peut se présenter sous différentes formes :

> Une forme colloïdale dans laquelle l'hydroxyde ferrique(Fe(OH)3 ou Fe(OH)2+ ou Fe(OH)++) peut être combiné au complexe argilo-humique. C'est surtout cette forme du fer qui donne à l'argile sa couleur : soit brune si l'oxyde est très hydraté (sous climats humides), soit brun-rouge à rouge si l'oxyde est peu hydraté ou même déshydraté (sous climats méditerranéens et tropicaux). C'est également sous cette forme d'oxyde ferreux que peuvent se fixer les anions phosphates. Le fer ainsi combiné est insoluble, et donc non échangeable.

> Une forme soluble et échangeable : en milieu réducteur pauvre en oxygène, le fer prend la forme bivalente ou ferreuse. L'acidité favorise cette réduction. Bien que le fer soit assimilable sous cette forme, le milieu réducteur est défavorable à l'activité des racines et des microorganismes et l'excès de fer peut même devenir toxique. En outre, l'abondance des ions Fe++ contribue à maintenir l'acidité du sol :

$$Fe^{++} + 3\,H_2O \rightarrow Fe(OH)_2 + 2\,H_3O^+$$

On comprend que les sols qui souffrent d'un excès d'eau soient aussi fréquemment des sols trop acides…

> Une forme cristalline : l'oxyde ferrique peut se cristalliser et former, autour des grains de sable, soit un simple film, soit un véritable ciment qui réunit ces grains en concrétions jusqu'à former, dans certaines conditions, de véritables bancs rocheux. Dans les régions arrosées, après migration des différentes formes de fer, la cristallisation peut conduire à la formation d'alios (véritable cuirasse de grès ferrugineux) fréquente dans les sols podzoliques installés sur roche mère sableuse.

*Alios*

> Une forme pseudo-soluble : le fer à l'état ferreux, ou ferrique, peut s'associer à la silice ainsi qu'à divers produits organiques, comme des protéines (caséine, gélatine, …), des acides minéraux (acide phosphorique, …), des aminoacides (acide aspartique, …), des hydroxyacides (acide lactique, malonique, …), et en particulier les acides humiques et fulviques. Il forme ainsi des complexes pseudo-solubles, c'est-à-dire que le fer est sous une forme colloïdale dispersée, et donc mobile. Parmi tous ces produits, certains sont susceptibles de former des complexes, d'autres des chélates avec Fe. C'est sous cette forme que le fer est généralement assimilé par les plantes et qu'il peut migrer soit vers le bas pour les sols bruns lessivés, soit vers le haut dans les sols rouges. En sols acides et riches en matières organiques solubles, il se forme des complexes ferro-humiques migrant facilement en profondeur, caractéristiques des sols podzoliques.

Ces phénomènes de chélation sont particulièrement importants : c'est l'oligo-élément le plus susceptible de se trouver en concentration importante sous forme chélatée.

[…]

[...]

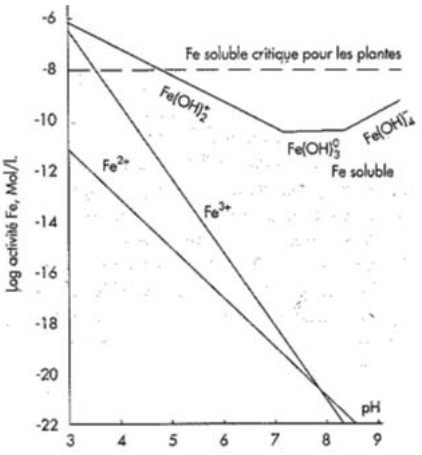
*Evolution de la chlorose sur pommier*

Nous avons décrit les différents états du Fer dans les sols. Connaître la forme sous laquelle cet élément se trouve dans le sol présente pour principal intérêt de nous renseigner sur son assimilabilité pour les plantes. Nous allons nous intéresser à ces aspects ainsi qu'aux signes de carence.

## L'ASSIMILABILITÉ DU FER

Dans les sols normalement aérés, le fer se retrouve essentiellement à l'état le plus oxydé, c'est-à-dire à l'état ferrique Fe+++. La solubilité de Fe dans les sols dépend donc surtout de la solubilité des oxydes ferriques, elle-même fortement influencée par le pH des sols.

*Solubilité de Fe inorganique en fonction du pH et du niveau*




*critique Fe pour les plantes (d'après Lindsay, 1984)*

Dans les conditions de sol réductrices, le fer se trouve essentiellement à l'état ferreux Fe++. La solubilité du fer est donc accrue ainsi que sa disponibilité. Toutefois, lorsque les conditions de sols deviennent asphyxiantes, par exemple dans les zones tassées des parcelles, l'activité des racines est perturbée et l'absorption du fer réduite.

D'autres facteurs augmentent les risques de chlorose tels que l'accumulation de métaux dans le sol comme le manganèse, le zinc ou le cuivre.

L'absorption du fer est aussi très sensible à l'influence d'autres cations tels que le potassium, le magnésium et le calcium.

En cas de chlorose ferrique en viticulture, on observe une augmentation très significative de la teneur en phosphore, potassium, magnésium et une diminution du calcium dans les feuilles atteintes de chlorose (1) par rapport aux autres feuilles non chlorosées qui est attribuée à une formation in suffisante de glucides.

A contrario, certains facteurs peuvent augmenter la solubilité Fe telles que les conditions d'oxydo-réduction et la présence de chélatants.

Enfin, l'exsudation d'agents complexants par les plantes dans la zone racinaire est susceptible d'augmenter la solubilité totale du fer dans les sols. Les différences variétales peuvent être importantes à cet égard.

## ABSORPTION DU FER

L'absorption du fer sous forme Fe++ ou dans un certaine mesure sous forme chélatée est liée à la capacité qu'ont les racines d'abaisser le pH et de réduire Fe+++ en Fe++ dans la rhizosphère. Certaines plantes et prioritairement les dicotylédones réagissent en induisant des réactions de solubilisation de Fe à la surface racinaire en :

> libérant des ions H+ (entraînant une baisse de pH),

> émettant des substances réductrices dans le milieu pour permettre l'accroissement du rythme de réduction de Fe+++ à Fe++ ,

> augmentant la production d'acide organique (citrique en particulier) et d'autres substances, ayant des propriétés de chélation du fer, alors que les graminées vont réagir en :

> produisant des phytosidérophores. (2)

## LES RÉPONSES AU STRESS

Les variétés diffèrent quant à leur aptitude à absorber le fer notamment en situation de stress. Les espèces efficaces pour absorber cet élément répondent à une trop faible assimilabilité du fer en développant des réactions qui permettent d'en augmenter l'absorption. Les espèces inefficaces n'ont pas cette faculté d'induire une réponse au stress.

Ces différences ont été largement utilisées par les sélectionneurs en arboriculture fruitière et en viticulture surtout : on va chercher à créer des associations de porte-greffes efficaces vis-à-vis de l'absorption de Fe et de scions capables de produire des fruits de la qualité recherchée.

## LES RÔLES DU FER

Parmi tous les oligo-éléments, le fer est celui dont les plantes ont le besoin quantitativement le plus élevé. Il entre dans la composition de plusieurs enzymes à hème (3) et sans hème, notamment catalase, peroxydase et cytochrome oxydase.

On retiendra que le fer joue un rôle essentiel dans la respiration, la synthèse de chlorophylle et la photosynthèse.

Par conséquent, les plantes souffrant de déficience ferrique souffrent d'une inhibition de la respiration.

Dans la plante, la majeure partie du fer se trouve sous forme d'une phosphoprotéine ferrique, la phytoferritine. Celle-ci constitue une réserve de fer dans les feuilles qui permet d'assurer les besoins de la photosynthèse. Les chloroplastes renferment une autre forme de fer, la ferrédoxine. Cette ferroprotéine peut agir comme transporteur d'électron et intervient comme système rédox dans la photosynthèse, dans la réduction des nitrites, des sulfates, dans la fixation de l'azote atmosphérique (dans le cas d'une carence en fer sur soja, on observe une absence ou une raréfaction des nodules).

## REPÉRER LES PRINCIPAUX SYMPTÔMES FOLIAIRES

La déficience en fer est la plus facile à reconnaître. Si la déficience est légère, une pâleur des feuilles peut être confondue avec une faim d'azote.
Au stade suivant, apparaît la chlorose internervaire, le jaunissement évolue en une teinte blanc ivoire. Puis les zones décolorées se nécrosent et le bord des feuilles peut aller jusqu'au dessèchement. Dans tous les cas, le fer migrant peu d'une partie de la plante à une autre, sa réutilisation reste localisée et sa carence affecte immédiatement les organes en voie de croissance.

L'assimilation du fer est fortement influencée par des facteurs externes, conditions d'oxydo-réductions, pH, associations cépages - porte-greffes ou variétés – porte-greffes (dans le cas des plantes pérennes)... Aussi, l'analyse des quantités de fer dans la partie végétale prend tout son sens pour s'assurer que l'assimilation en cet élément est à son optimum.

*Bibliographie :*
*- Oligo-éléments en agriculture, André Loué*
*- Les bases de la production végétale Tome 1 : Le sol Dominique Soltner*
*- Le fer dans les sols, P Segalen, ORSTOM*

*(1) Chlorose : Carence en chlorophylle des plantes se traduisant par la coloration jaune pâle des organes qui devraient être verts (feuilles, tiges) et pouvant avoir des causes diverses (anomalie génétique, carence du sol en fer, infections parasitaires, etc.). Dictionnaire Larousse.*

*(2) Phytosidérophore : bio-molécule présentant une forte affinité pour les métaux, le fer en particulier. Les phytosidérophores sont sécrétés par les Graminées et mobilisent les métaux en formant avec eux des complexes stables et solubles. M.C Girard, C. Walter, J. Berthelin, J.C. Remy, JL Morel. 2005 - Sols et Environnement. Cours et Etudes de cas. Dunod, coll. Sciences Sup. 832 p.*

*(3) Hème : structure aromatique contenant un atome de fer*

# UN MINIMUM D'ALUMINIUM

*Publié le 6 février 2014*

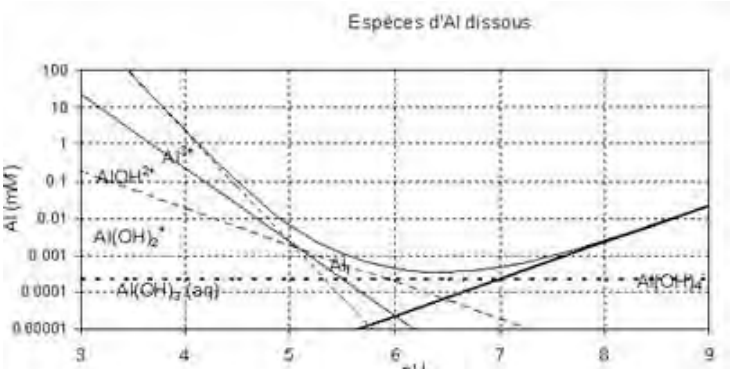
L'aluminium, métal le plus présent dans l'écorce terrestre (8% de sa masse, derrière l'oxygène 47% et le silicium 28%, mais devant le fer 5% et le calcium 4%), mérite bien un Agro Reporter. En agronomie, l'aluminium est surtout identifié pour la toxicité qu'il peut présenter en sols trop acides. Même si ce phénomène est surtout connu en zones intertropicales, on peut parfois le rencontrer en France. Cette toxicité aluminique fait partie des grands problèmes agronomiques mondiaux (en lien avec l'acidité et l'acidification), comme la salinité, les excès de magnésium ou l'érosion. Nous n'aborderons pas les problèmes que peut engendrer l'aluminium pour la santé humaine et animale (troubles neurologiques dans ses formes solubles ou pulmonaires dans ses formes pulvérulentes) ou pour l'environnement, même s'ils deviennent de plus en plus préoccupants.

**Sol à pH eau inférieur à 4 et à toxicité aluminique sur prairie. Rwanda 2011,région de Butare .**
**Source : AgroReporter**

## L'aluminium dans les sols

Trop réactif, l'aluminium ne se trouve, dans la nature, qu'associé à d'autres éléments. Plus de 250 minéraux en contiennent, le plus connu étant la bauxite. Ce minerai provient de l'altération de roches contenant des minéraux argileux (ou silicates d'alumine). Le climat tropical favorise cette dégradation (ce qui était le cas dans les Baux-de-Provence pendant le Crétacé, d'où le nom de bauxite). Dans le sol, on peut trouver l'aluminium sous quatre formes principales : les constituants cristallisés (minéraux argileux), les constituants amorphes (hydroxydes, oxydes, silicates alumineux), les constituants incorporés ou chélatés dans la matière organique et les constituants adsorbés plus ou moins fortement sur les complexes, (Al3+ , Al(OH)++, Al(OH)2+). Ce dernier groupe, le plus mobile, va être en relation avec les racines des plantes et intéresse donc l'agronome. On connaît depuis 1904 par les travaux de Veitch (cité par P. Segalen, 1973) la propriété de l'aluminium de se fixer sous forme ionique (Al3+) sur le complexe absorbant des sols acides et son extraction possible par les sels neutres. Cet aluminium est appelé parfois aluminium actif ou mobile, mais le plus souvent aluminium échangeable (Aléch), suivant la terminologie anglo-saxonne.

L'aluminium échangeable n'existe que dans les sols acides et surtout fortement acides (J. Boyer, 1976). La lixiviation des cations, très importante en zone subtropicale à forte pluviométrie, entraîne une désaturation du complexe d'échange et l'acidification du sol. Cette acidification provoque la dissolution des minéraux et la libération des ions Al3+ qui se fixent alors sur




les sites vacants du complexe.

L'excès d'aluminium échangeable dans la solution du sol conduit à des toxicités aluminiques pour le végétal, surtout pour des pH eau inférieurs à 5. Si ce risque concerne moins de 1% des sols français, il est présent sur près de 40% des sols agricoles dans le monde (85% pour un pays comme le Rwanda, par exemple), en lien direct avec les niveaux d'acidité (source FAO).

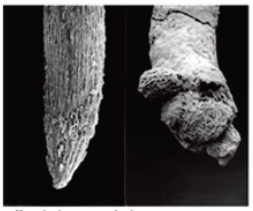
## Effets de l'excès d'aluminium dans les sols

L'excès d'aluminium échangeable inhibe l'activité de la microflore et d'une partie de la microfaune (champignons, bactéries) du sol, même s'il est difficile de distinguer l'effet direct de l'aluminium de celui du pH trop acide.
L'aluminium présent sur le complexe absorbant du sol s'oppose, par un effet « tampon », à tout relèvement du pH tant qu'il n'est pas complètement éliminé du complexe. Ainsi, s'il n'est pas tenu compte de l'aluminium dans la politique de chaulage, les apports d'amendement calciques sont souvent très peu efficaces pour le redressement du pH.
Enfin, l'aluminium extrait le potassium des sites d'échange et « appauvrit » ainsi le sol (il en est de même pour un amendement calco-magnésien mal géré). Il est par contre facilement déplacé par le calcium.

## L'aluminium et la plante

Si pour certains auteurs l'aluminium est indispensable aux plantes, à très faible dose, il ne préoccupe que pour sa toxicité à forte dose. Cette toxicité est directe (inhibition de la croissance des racines par blocage des divisions cellulaire, voire des organes aériens) et surtout indirecte :
- **Complexation** du phosphore sous forme de phosphates d'alumine empêchant sa migration dans la plante. Il semble que ce soit l'effet majeur des toxicités aluminiques,
- **Antagonisme** avec le cuivre et surtout le calcium,
- **Synergie** avec le manganèse dont il favorise l'absorption, au risque de provoquer des intoxications manganiques. De plus, comme pour l'aluminium, la solubilité du manganèse augmente en sols acides. Les toxicités manganiques et aluminiques sont souvent conjointes et difficilement dissociables.

Il n'y a pas de symptômes globalement spécifiques à la toxicité en aluminium : ralentissements de croissances, blocages, atrophies végétatives (moindre potentiel de production) et, dans les cas graves, mortalité.



**Effet de la toxicité aluminique par microscopie électronique sur racines de blé. Source : Zhou et al, 2011**

L'absorption d'aluminium par les racines est, au départ, un phénomène passif. Puis, au-delà d'une certaine concentration dans la solution, l'absorption devient proportionnelle à la quantité d'aluminium présent (G. Guerrier, 1978). Certains végétaux, comme le théier, sont capables d'absorber, sans symptômes, des quantités très importantes d'aluminium.

Il n'existe pas de plantes résistantes, au sens strict, à la toxicité de l'aluminium. Les plantes calcicoles sont souvent les plus sensibles à cette toxicité alors que les plantes acidophiles sont plus tolérantes à l'aluminium. Il existe une grande variabilité génétique sur cette tolérance pour une même espèce. Par exemple, les niveaux en aluminium tolérés entre les génotypes de blé les plus sensibles et les génotypes les plus tolérants diffèrent d'un facteur 10. Ces tolérances sont souvent à déterminisme monogénique (voir plus loin).

## L'aluminium au laboratoire

• Dosage : Le laboratoire LCA réalise la mesure de la concentration en aluminium échangeable par dosage après extraction au KCl 1M (10 g de terre dans 50 ml de solution au KCl à 74.5 g/l) selon la méthode de Jackson. (...)

(...)
La mesure se fait au pH du sol. Dans ces conditions, seuls les ions Al3+ sont extraits, à l'exclusion des hydroxydes. D'autres solutions d'extraction peuvent être utilisées : acétate d'ammonium tamponné à pH 7, ou solution de chlorure de baryum à pH 8.1 selon la méthode Mehlich. Dans ces cas, l'aluminium extrait provient des ions Al3+ et des hydroxydes d'aluminium. Les mesures issues de deux méthodes différentes ne sont donc pas comparables.

Les laboratoires français ne pratiquent pas en routine, sur les sols continentaux, l'extraction et le dosage de l'aluminium échangeable. Cette mesure sera réservée aux cas particuliers, principalement des sols très acides. La mesure du pHeau, très liée à la teneur en aluminium échangeable permet, dans la majorité des cas, d'anticiper les risques, mais seul le dosage permet de les apprécier finement.
Le pH eau n'étant pas une donnée constante de la parcelle (variation saisonnière, fonction de l'humidité du sol, …), le pH KCl lui est souvent préféré comme indicateur (IFDC, Catalist Project, Rwanda 2008) dans les régions ou pays concernés par la toxicité aluminique. Le plus souvent, il s'agit de zones climatiquement homogènes où la pluviométrie, directe ou indirecte par l'irrigation, est supérieure à l'évapotranspiration, avec un courant globalement descendant de l'eau dans le sol (K. Frenken FAO 2012). Les figures 1 et 2 illustrent ce point avec un coefficient de détermination de 68% entre le pH eau et l'aluminium échangeable, alors qu'il est de 82% pour le pH KCl sur la même série de sols provenant de la région de Bururi au Burundi. La nature et la composition des sols et leur richesse naturelle en aluminium expliquent le manque de linéarité.

La qualité de la relation entre les teneurs en aluminium échangeable, pHeau et pHKCl n'a pas été suffisamment étudiée sur les sols français pour pouvoir privilégier telle ou telle mesure du pH, malgré de nombreuses études sur les sols acides . Il n'en demeure pas moins qu'elle mériterait d'être approfondie sur les sols acides ultramarins et métropolitains, irrigués et non irrigués.
On considère habituellement qu'il faut atteindre un pH eau supérieur à 5,5 pour que la quasi-totalité de l'aluminium échangeable disparaisse.

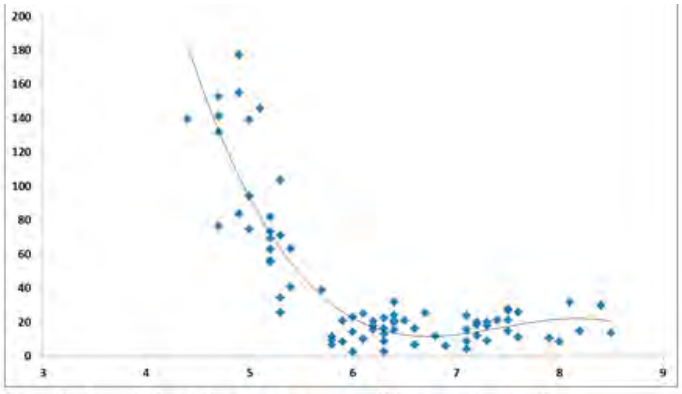



Figure 1 - Exemple de relation entre la teneur en Al échangeable et le pH eau.
Source Stabex Burundi 2010, analyses LCA.

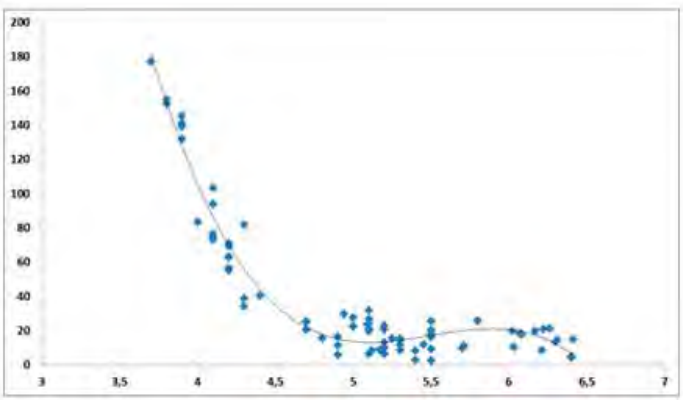



Figure 2 - Exemple de relation entre la teneur en Al échangeable et le pH KCl.
Source Stabex Burundi 2010, analyses LCA.

## Interprétation de la mesure

La prise en compte de la teneur en aluminium échangeable discrimine mieux les situations avec des risques de pertes de production que la mesure du pH eau, mais avec des difficultés pour calculer un seuil précis.
Les travaux de Justes (1966) dans les sables des Landes ont fait ressortir un seuil de toxicité de 50 mg/kg d'aluminium échangeable. En expérimentation, des pertes de rendement supérieures à 10 % ont été observées pour des teneurs en aluminium échangeable variant suivant les sites, de 30 à 100 mg/kg : ceci s'explique par l'interaction de l'aluminium avec la matière organique, l'extraction au KCl qui extrait certaines formes non toxiques et l'interaction possible dans certains sols avec la toxicité manganique (non mesurable). (A BOUTHIER, colloque INRA 2001).
En dehors de références plus précises, aujourd'hui la teneur en aluminium échangeable s'apprécie par rapport au seuil de toxicité de 50 mg/kg. Ce seuil est probablement plus élevé quand on a une teneur importante en matière organique dans le sol.
Les agronomes travaillant dans les pays tropicaux préfèrent utiliser des valeurs relatives tenant compte de l'environnement des autres cations. Par exemple la relation du « m de Kamprath » (1970) exprimant la « saturation par l'aluminium » :
m = (Aléch * 100) / (Aléch + S) avec S = somme des bases échangeables (Ca, Mg, K et Na).
Les valeurs de m vont permettre de donner des seuils limite pour les cultures, comme l'indique le tableau ci-dessous.

| | Seuil de forte toxicité (ppm) * | Valeur maximale de m (%)* |
|---|---|---|
| tabac | 3 | 5 |
| luzerne, blé, cacaoyer, caféier, cotommier | 25 | 10 |
| soja, arachide, canne à sucre, haricot | 50 | 25 |
| maïs, riz pluvial | 120 | 40 |
| hévéa, palmier à huile, manioc, ananas | 200 | 50 |
| théier | > 300 | > 50 |

* à moduler par variétés

*Seuil de forte toxicité en aluminium échangeable et valeur du « m de Kamprath » pour quelques cultures (d'après A. Edou-Minko, 2003)*

## Moyens d'action

Dans des situations très acides, différents moyens d'action sont envisageables. Le choix de l'un ou l'autre d'entre eux dépasse parfois les simples critères technico-économiques :

- **Les amendements minéraux basiques :**

Le calcium agit à plusieurs niveaux : antagonisme avec l'aluminium, déplacement de celui-ci du complexe et insolubilisation, remontée du pH, amélioration de l'assimilation du phosphore…
Une simple élimination de l'aluminium, dans la mesure où cela concerne une acidité potentielle, ne relève pas, ou peu, le pH. Par contre, dès que l'élimination de l'aluminium est complète, le pH augmente alors rapidement. Le phénomène étant complexe et difficilement modélisable (intervention du niveau et de la nature de la matière organique, nature des argiles…), la méthode « expérimentale » (par tâtonnement) est la plus efficace pour déterminer la dose exacte d'amendements à utiliser (J. Boyer, 1976).
Par ailleurs, s'il est techniquement envisageable d'améliorer le sol, il est beaucoup plus compliqué de le faire pour le sous-sol.
La correction de l'acidité est difficile dans beaucoup de sols tropicaux (mais aussi français) quand ils contiennent des argiles à charge variable (1) . La nature de l'argile est un paramètre à prendre en compte avant tout investissement de chaulage, notamment parce que certaines, comme les illites, fournissent plus d'aluminium échangeable que d'autres : l'apport d'amendement augmente alors la capacité d'échange cationique (CEC), ce qui accroît les besoins en produits calciques et en engrais. Il est donc important alors, dans une vision d'économie d'intrants, de viser un pH juste suffisant pour la culture la plus sensible de la rotation, en général de 5,5.(...)

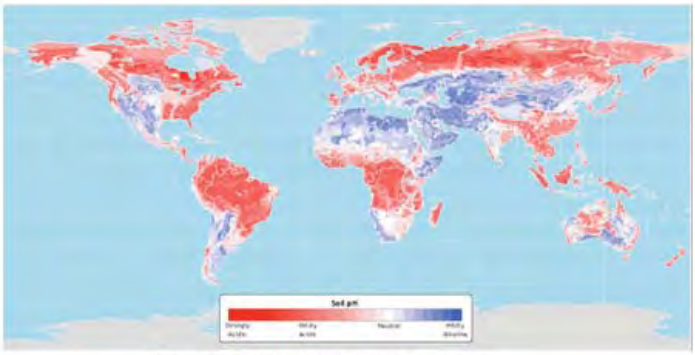
(...)
Le brûlis de la végétation, qui a une certaine efficacité neutralisante, n'est envisageable qu'en agriculture de subsistance ou lors d'un défrichement.
Dans les régions tempérées, il y a peu de risques de sur-chaulage (sauf sur sols peu tamponnés, surtout s'ils sont irrigués). Ce n'est pas le cas dans la plupart des régions tropicales où « il vaut mieux considérer le chaulage comme une fertilisation en calcium plutôt qu'une modification du pH pour éviter l'appauvrissement, à moyen terme, des sols, mais aussi une dégradation physique» ( Robert D. Harter, Ph.D., Les sols acides des Tropiques, 2007).

**• La matière organique :**
En complexant les ions aluminium, la matière organique peut diminuer les toxicités aluminiques, à condition d'être raisonnée conjointement avec l'entretien calcique (des pH du sol trop faibles ne permettant pas aux micro-organismes d'être efficaces). Cette action désintoxiquante de la matière organique vis-à-vis d' Al3+ mais aussi du Mn2+ a souvent une efficacité rapide (Wouters, 1991).

**• L'apport de phosphore :**
Le phosphore précipite l'aluminium échangeable et réduit donc sa toxicité. Du fait de son coût, cette technique est peu utilisée.

**• Le choix des espèces :**
Face au coût du chaulage pour la majorité des pays en voie de développement (notamment du fait de la nature pondéreuse des produits calco-magnésiens), il est souvent conseillé de réfléchir plutôt aux espèces adaptées à l'acidité et aux variétés les plus tolérantes.

**• Le progrès génétique :**
Des chercheurs australiens et japonais ont découvert en 2006 un gène (ALMT1) contrôlant la tolérance du blé pour l'aluminium (le même phénomène ayant été observé sur le maïs et le haricot). Cette tolérance est associée à l'induction par l'aluminium d'un efflux de malate ou de citrate (composés organiques de charge négative) au niveau des apex racinaires. Ces molécules complexent les cations Al3+ et les rendent inactifs. Il a été ainsi possible de fortement améliorer la résistance à la toxicité aluminique de l'avoine (naturellement très sensible) en le modifiant génétiquement. Pour d'autres espèces, le mécanisme de tolérance apparaît beaucoup plus complexe.
Face à l'enjeu mondial que représente la toxicité aluminique, en particulier dans les zones subtropicales et à la quasi impossibilité qu'ont les agriculteurs des pays concernés à pratiquer des amendements calco-magnésiens, on comprend pourquoi les semenciers internationaux s'intéressent beaucoup à modifier génétiquement certaines cultures vivrières (manioc, mil, sorgho…) sur le critère de résistance à l'aluminium. On imagine facilement aussi toutes les questions que cela soulève.



*Carte de l'acidité des sols dans le monde*
*(Atlas of the Biosphere, Center for Sustainability and the Global Environment (SAGE), University of Wisconsin - 2002*

On voit donc que si le problème de la toxicité aluminique n'est pas primordial en France (au moins pour les sols), il revêt une très grande importance mondiale avec des implications qui dépassent de très loin le seul contexte agronomique. Le Service Agronomie du LCA est à votre disposition pour toute information complémentaire. N'hésitez pas à nous contacter !

(1) Charge variable : charge dépendante du pH, en lien avec la présence de groupes fonctionnels en bordure des argiles (SiOH--), et/ou sur la matière organique (groupements –COOH, phénols), et/ou d'oxy-hydroxydes. Le nombre de charges variables augmente lorsque le pH augmente.

# L'AZOTE : LA ZONE ?

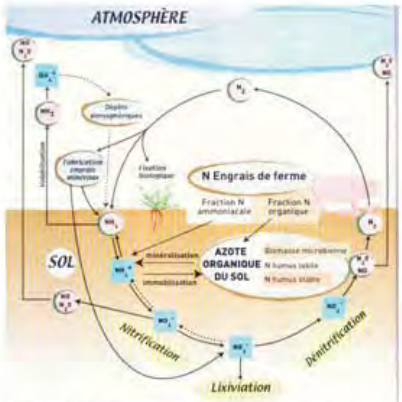
*Publié le 13 octobre 2011*

Azote organique, minéral, total, Kjeldahl… comment s'y retrouver dans toutes ces formes ? En partant du cas spécifique de l'azote uréique, dernier venu des formes à analyser dans les amendements normalisés, nous allons aborder les différentes configurations d'azote rencontrées dans les produits organiques.

« L'urée, nom que j'ai donné à une substance différente de toute autre matière animale et qui caractérise l'urine ». C'est ainsi que Antoine-François Fourcroy baptise et décrit en 1797 (1). cette forme particulière d'azote, découverte en 1773 par le chimiste français Hilaire Rouelle. Si l'urée est présente à l'état naturel dans le règne animal, celle que nous connaissons en agriculture est obtenue par synthèse (2) . Très riche en azote (46%), c'est une molécule carbonée, donc organique, dont le comportement agronomique s'apparente à celui des engrais minéraux, si les conditions d'hydrolyse sont réunies.

## LE POINT DE VUE D'UNE RACINE

L'azote utile et utilisable pour la plante, est avant tout l'azote minéral dissous dans la solution du sol. L'azote est assimilé par les racines sous forme de nitrates (NO3- ) ou, parfois, d'ions ammonium (NH4+). Alors pourquoi s'intéresser aux autres formes de l'azote dans le sol ou dans les produits fertilisants ? L'explication vient des possibilités de modifications biogéochimiques de cet élément dans l'environnement, connues sous le terme de « cycle de l'azote ».




*Source : Fertiliser avec les engrais de ferme (Institut de l'Elevage, ITAVI, ITCF, ITP)*

Les ions nitrate et ammonium proviennent de la décomposition de la matière organique dans le sol. Les molécules organiques contenant de l'azote se décomposent dans le sol sous l'action des décomposeurs (= des bactéries du sol). Cette décomposition produit de l'azote sous forme minérale (= des nitrates). Les plantes utilisent les nitrates puisés par leurs racines pour fabriquer de la matière organique azotée. Et le cycle recommence.

Mais les différentes phases du cycle ne « tournent » pas toutes à la même vitesse. Ainsi l'ammonification par minéralisation de la matière organique peut être plus rapide que la phase de nitrification.

Et l'urée ? Les racines ne sont pas capables de l'absorber directement en quantité significative. L'hydrolyse par les microorganismes du sol possédant une uréase, qui permettra sa transformation en ammonium, demande une journée à une semaine selon les conditions de température et d'humidité. On comprend alors que mieux connaître les formes d'azote dans le sol, ou dans les fertilisants épandus, permettra de mieux apprécier la dynamique de la fourniture d'azote sous une forme utile pour la plante.



## DE QUOI PARLE-T-ON ?

Dans les fertilisants organiques, les formes d'azote potentiellement présentes sont nombreuses :

> **L'azote organique :** forme majoritaire, intégrée dans des molécules carbonées, apportée par les matières premières et variable selon la nature de celles-ci. Dans le contrôle réglementaire des matières fertilisantes, deux catégories sont distinguées :

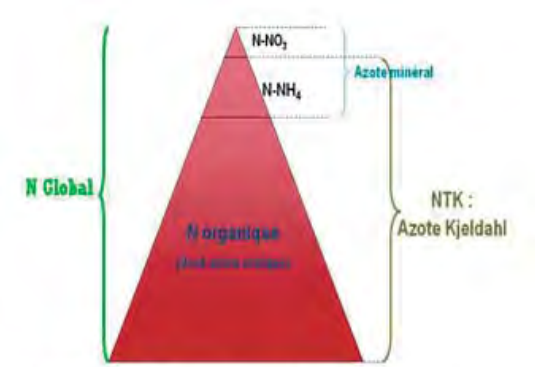
> ***Azote organique non uréique :*** on peut citer l'azote contenu dans les acides aminés, fibres organiques, corps microbiens, protéines de structure, formes organiques de réserve des végétaux, polypeptides etc…

> ***Azote uréique :*** l'urée est une petite molécule organique dont la formule chimique est CO(NH2)2. Produit naturellement par de nombreux animaux, dont les mammifères, c'est un déchet issu du métabolisme des protéines et des acides aminés, et excrété dans les urines. Il ne faut pas confondre azote uréique, azote contenu dans une molécule d'urée, avec azote urique, azote contenu dans une molécule d'acide urique (C5H4N4O3), présent dans les selles des oiseaux ou des reptiles. Sauf adjonction d'urée, cette forme est rarement présente en quantités significatives dans les produits organiques.

> **L'azote minéral :** dans les fertilisants, il peut se présenter sous deux formes (3).

> ***Azote ammoniacal, de formule chimique N-NH4+*** : forme souvent présente mais en quantité beaucoup plus faible comparé à l'azote organique dans les produits d'origine végétale. Dans les fientes et les lisiers, au contraire, l'azote ammoniacal peut atteindre des valeurs égales voire supérieures à celles de l'azote organique.

> ***Azote nitrique, de formule chimique N-NO3-*** : forme souvent minoritaire dans les fertilisants organiques, de l'ordre de quelques grammes par kilogramme de produit. La situation est bien évidemment très différentes dans les engrais minéraux ou dans les amendements organiques avec ajout l'engrais minéral




*Les différentes formes d'azote au laboratoire*

## AU LABORATOIRE

Les méthodes de laboratoire ne permettent pas de séparer et de doser simplement les différentes formes. Il faut donc utiliser différentes techniques pour mesurer ou calculer les formes recherchées.

[…]

[...]

**Les résultats issus de dosage au laboratoire, toujours mesurés sur le produit frais, sont :**

> Azote Kjeldahl (NtK), qui quantifie de façon globale l'ensemble des formes d'azote organique et l'azote ammoniacal. Le dosage Kjeldahl, très répandu, ne permet pas de distinguer les différentes formes d'azotes organiques, de synthèse ou non, de l'azote ammoniacal ou de l'azote uréique.

> Azote ammoniacal

> Azote nitrique

> Azote uréique

**Ces mesures permettent de calculer les formes suivantes :**

> Azote organique : N organique = NtK – NNH4

> Azote organique non uréique : N organique non uréique = N organique – N uréique> Azote total ou global (NTotal) : NTotal = NtK + NNO3

## ADAPTER LA DEMANDE D'ANALYSE EN FONCTION DU PRODUIT

Dans la majorité des produits organiques de type fumier, lisier, fientes, boues ou composts non normalisés, le dosage de l'azote Kjeldahl, utilement complété par l'azote ammoniacal, peut suffire. La quantité d'azote organique peut ainsi être calculée, et le rapport C/N approximé.

Pour les amendements organiques normalisés, la situation est différente. La réforme et la mise à jour de la norme NF U 44-051 qui précise les dénominations, spécifications, et marquage des amendements organiques, publiée en avril 2006 par l'AFNOR, a introduit la différenciation des formes uréiques des autres formes d'azote. Ainsi, l'évolution normative des 10 dernières années conduit à rechercher toutes les formes d'azote dans les amendements organiques normalisés (NF U44-051 et Classe B de la NF U44-095).

Norganique, Norganique non uréique, NNH4, NNO3, doivent être déterminés, et NTotal doit pouvoir être calculé, de façon à vérifier que les spécifications des normes concernant l'azote sont bien satisfaites :

> NTotal < 3% du produit brut, pour tous les amendements organiques
> Rapport Matière Organique / Norganique < 40, pour les composts de MIATE uniquement

> Rapport Carbone / NTotal > 8, pour les amendements NF U44-051 uniquement

> Rapport (NNO3 + NNH4 + Nuréique) / NTotal ≤ 0,33, pour les amendements NF U44-051 sans ajout d'engrais uniquement.

La norme NF U44-051 (2006) préconise l'application de la norme NF U42-191 (1988) pour le dosage de l'azote uréique.
Celle-ci a été adaptée pour mieux répondre aux spécificités des amendements organiques.

Le laboratoire LCA propose une gamme d'analyses dédiées aux amendements organiques NF U44-051, comportant l'analyse systématique de l'azote uréique. N'hésitez pas à nous contacter pour choisir l'analyse adaptée à votre produit.

*(1) FOURCROY, Conn. Chim. T.1, p CLXIV*

*(2) La première synthèse chimique de l'urée a été réussie en 1828 par Friedrich Wöhler*

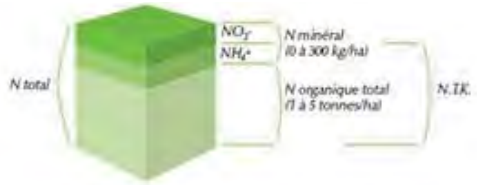
*(3) Expression des résultats : l'azote ammoniacal exprimé sous la forme N-NH4 représente la part de l'élément azote N, contenu dans l'ammonium NH4+ . L'azote nitrique N-NO3- représente la part de l'élément azote N, contenu dans les nitrates NO3-. Pour additionner ou soustraire les différentes formes d'azote présentes dans un produit, il est nécessaire de comparer les résultats exprimés en élément N.*

# LES RELIQUES DE L'AZOTE

*Publié le 8 décembre 2011*

Après un automne marqué par la douceur des températures, on s'interroge sur les quantités d'azote encore présentes dans le sol avant l'arrivée des précipitations hivernales... Couplées au climat des prochaines semaines, elles vont conditionner l'offre du sol en azote disponible à la reprise de la végétation, en sortie d'hiver. Dans l'intervalle, l'azote non utilisé risque de se retrouver hors d'atteinte des racines des cultures suivantes. Perdu pour les cultures, il peut se retrouver dans les nappes phréatiques.

## NE PAS CONFONDRE...




*Azote total, azote organique, azote minéral : ordres de grandeur dans un sol agricole*

Un sol agricole moyen contient de l'ordre de 2 à 10 tonnes d'azote total par hectare, dans son horizon de surface (1) . Ce chiffre ne doit pas être confondu avec l'azote minéral, sous forme ammoniacale et nitrique, qui se situe plutôt entre 0 et 300 kg/ha. Seule la quantification de ces formes minérales, sur toute la profondeur exploitable par les racines, permet d'évaluer l'offre du sol en azote disponible pour les cultures (lorsqu'elles sont présentes) ou les risques de pollution à un moment précis. Cette mesure, connue sous le nom de « reliquat azoté » contribue à l'ajustement du niveau de fertilisation azotée sur les cultures d'hiver et de printemps. Contrairement à la mesure de l'azote total du sol, qui évolue lentement, la quantité d'azote minéral est susceptible de varier fortement dans l'année pour un sol donné. Ainsi le reliquat azoté en sortie d'hiver va être sensible au niveau des précipitations hivernales, aux pratiques de fertilisation organique et minérale sur la parcelle, et à la présence ou non d'une culture intermédiaire. Dans une même région et pour des itinéraires techniques identiques, il va varier en fonction des types de sol.

## LA MESURE DU RELIQUAT AZOTÉ AU LABORATOIRE

La mesure du reliquat azoté d'un sol se fait en trois étapes. On commence par déterminer l'humidité du sol sur un échantillon dédié, puis on dose séparément l'azote nitrique et l'azote ammoniacal sur deux autres sous-échantillons, selon le schéma suivant :

- Homogénéisation de l'échantillon de sol frais.
- Mesure de l'humidité sur une partie séparée de l'échantillon.
- Extraction de l'azote minéral. Rapport d'extraction :
  > 25 g de terre fraîche.
  > 50 ml d'une solution de chlorure de potassium
- Agitation 1 heure.
- Décantation et centrifugation.
- Dosage par colorimétrie sur chaîne à flux continu.

Le laboratoire LCA, via son unité analytique Labgrisol, est agréé par le Ministère de l'Agriculture pour la mesure des reliquats azotés.

## EXPRESSION DES RÉSULTATS

Les concentrations en azote ammoniacal et en azote nitrique sont exprimées :
En mg/kg de terre humide = "X" mg/kg
En mg/kg de terre sèche (2) =X/[1000 – H]/1000] = "Y" mg/kg
(avec H = Humidité en pour mille)

**La quantité d'azote minéral** disponible dans la couche de sol considérée, exprimée en kg/ha, est obtenue en additionnant N-NH4 et N-NO3 (3) et en tenant compte de la densité apparente du sol et de la profondeur prélevée, selon la formule suivante :

**Y *[poids de terre fine en T / ha] / 1000**

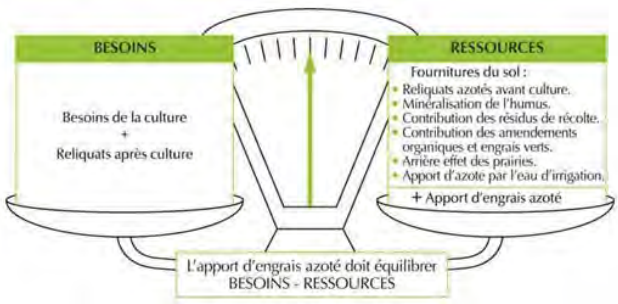
Si le prélèvement comporte plusieurs horizons, le résultat de reliquat azoté précise les quantités d'azote minéral par horizon et calcule la somme sur l'ensemble des horizons.

## PRÉLÈVEMENT À LA PARCELLE

Il est conseillé de réaliser 15 points de prélèvement, en décrivant un cercle d'une dizaine de mètres de rayon, dans une zone représentative de la parcelle. En chaque point, le prélèvement s'effectue par horizon de 20 à 30 cm d'épaisseur, selon la profondeur de travail du sol (il est important, pour l'expression du résultat final en kg/ha, de préciser les profondeurs de prélèvement, ainsi que l'état de pierrosité du sol). Pour chaque horizon, les prélèvements des 15 points sont rassemblés et homogénéisés de façon à constituer un échantillon moyen de l'horizon de 300 à 500 grammes pour le laboratoire.
Il est impératif de conserver ces échantillons au froid (4 à 6°C) et de les envoyer au laboratoire dans les meilleurs délais, en glacière réfrigérée. Si les conditions de prélèvement ne permettent pas une réception de l'échantillon sous 48 heures par le laboratoire, il est préférable de congeler l'échantillon.

## RÉTABLIR L'ÉQUILIBRE

Une fois l'analyse terminée, comment utiliser le résultat de reliquat azoté ? Que faire avec ces valeurs et quelle confiance leur apporter ? En effet, comme le montre le schéma ci-dessous, le chiffre ne fait pas tout, et il n'intervient que pour une part dans le bilan azoté :
Pour être valorisés, ces résultats sont soit intégrés à un logiciel de calcul de la dose d'engrais à apporter, soit intégrés aux termes de la méthode des bilans..


BESOINS
Besoins de la culture
+
Reliquats après culture
RESSOURCES
Fournitures du sol :
• Reliquats azotés avant culture.
• Minéralisation de l'humus.
• Contribution des résidus de récolte.
• Contribution des amendements organiques et engrais verts.
• Arrière effet des prairies.
• Apport d'azote par l'eau d'irrigation.
+ Apport d'engrais azoté
L'apport d'engrais azoté doit équilibrer
BESOINS - RESSOURCES

## UN PEU D'HISTOIRE

La prévision de la fertilisation azotée repose sur un bilan prévisionnel de l'azote minéral entre 2 dates : le semis de la culture (ou la mi-février pour les cultures de printemps) et la récolte. Auparavant, cette méthode était la base du modèle AZOBIL®, utilisé à grande échelle en France pour la fertilisation des cultures annuelles de plein champ. D'autres organismes ont aussi élaboré leur propre outil de raisonnement de la fertilisation (en général des logiciels), adapté à un type de production ou à un contexte particulier (par exemple, petite région caractérisée par un pédo-climat), mais la plupart de ces outils s'inspirent du raisonnement par la méthode du bilan et des références d'AZOBIL®.

AZOBIL® a été testé dans l'Est de la France, puis généralisé à l'ensemble du territoire : les situations réelles ne sont pas toujours adaptées, car les types de sol et le climat diffèrent d'une région à l'autre.

[...]
P.15

[..]

## ET AUJOURD'HUI

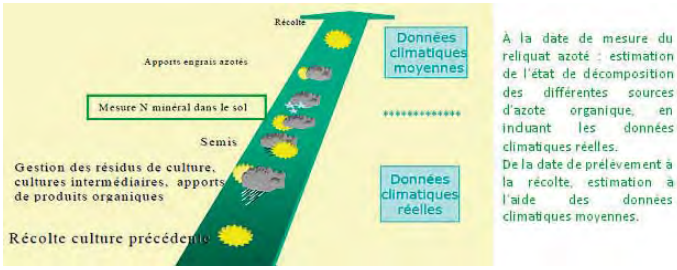
Le conseil de fumure (5) ne se déduit donc pas si simplement qu'on pourrait le penser et on doit parfois adapter le raisonnement en fonction des informations dont on dispose. Au LCA, 2 types de conseils sont proposés, selon le nombre d'horizons prélevés et le niveau d'information transmis :

**> Interprétation FERTIAZOTE :** la seule possible pour les reliquats azotés réalisés sur un seul horizon, lorsque la nature du sol ne permet pas de prélever en profondeur (cas des terres superficielles de Charente-Maritime par exemple). Elle est souple et adaptée à toutes les situations. Basée sur un système semi-expert, seuls les principaux postes du bilan sont nécessaires dans la formule de calcul. Les autres valeurs sont prises par défaut en cas d'absence de renseignement. Le type de sol, le précédent cultural, ainsi que la culture à fertiliser sont des informations obligatoires à fournir, sans quoi l'interprétation ne peut se faire.

**> Interprétation par AZOFERT®** (possible à partir de 2 horizons) : développé par l'INRA pour répondre à la demande croissante en matière de productions de qualité et de protection de l'environnement (4), cet outil repose sur un bilan dynamique, avec une prise en compte des réelles spécificités pédo-climatiques locales. Il simule au cours du temps la fourniture d'azote par le sol et les différentes sources organiques (résidus de la culture précédente, résidus de cultures intermédiaires, produits organiques exogènes divers).

Le logiciel AZOFERT® est basé sur un bilan prévisionnel complet. On estime, avant l'apport d'engrais, tous les termes d'un bilan de l'azote minéral du sol sur la profondeur d'enracinement de la culture et sur une période couvrant le cycle de développement de cette culture.

## POUR MIEUX COMPRENDRE


Récolte
Apports engrais azotés
Mesure N minéral dans le sol
Semis
Gestion des résidus de culture, cultures intermédiaires, apports de produits organiques
Récolte culture précédente
Données climatiques moyennes
Données climatiques réelles
A la date de mesure du reliquat azoté : estimation de l'état de décomposition des différentes sources d'azote organique, en incluant les données climatiques réelles.
De la date de prélèvement à la récolte, estimation à l'aide des données climatiques moyennes.

L'équation du bilan de masse s'écrit ainsi :

**État final – État initial = Entrées – Sorties**

Mais derrière cette formule simplifiée se cachent de nombreux paramètres, appelés « postes » : le moteur d'interprétation en fait intervenir 19 (contre 12 dans le logiciel Azobil®).
Ce conseil, plus juste car il prend en compte un plus grand nombre de données en entrée, nécessite en contrepartie une « rigueur » dans le renseignement de la fiche accompagnant les échantillons.
Modèle évolutif, il autorise l'intégration de nouveaux fertilisants (produits organiques ou engrais), des types de sols particuliers et bien connus, ou encore des cultures, qui ne seraient pas au catalogue d'origine (à condition de disposer des données nécessaires au paramétrage).

(1) Valeur moyenne pour un sol à 2% de matières organiques et 3000 t/ha de terre fine.

(2) C'est sous cette dernière expression que les résultats sont généralement donnés séparément pour N-NH4 et N-NO3.

(3) N-NH4 et N-NO3 sont les abréviations conventionnelles des termes « azote ammoniacal, exprimé en N » et « azote nitrique, exprimé en N ». Il ne s'agit pas de formules chimiques.

(4) : De plus en plus de reliquats azotés sont pratiqués après récolte et, dans ce cas, n'ont pas un but de conseil de fertilisation, mais sont plutôt réalisés dans un cadre environnemental de contrôle des bonnes pratiques de fertilisation.

(5) : L'interprétation des reliquats et le calcul du conseil de fertilisation concernent principalement la grande culture et le maraîchage. Nos logiciels d'interprétation ne sont pas encore développés pour les cultures pérennes, et les travaux sont en cours à l'INRA pour les intégrer dans Azofert®

# METHODE DU BILAN AZOTE

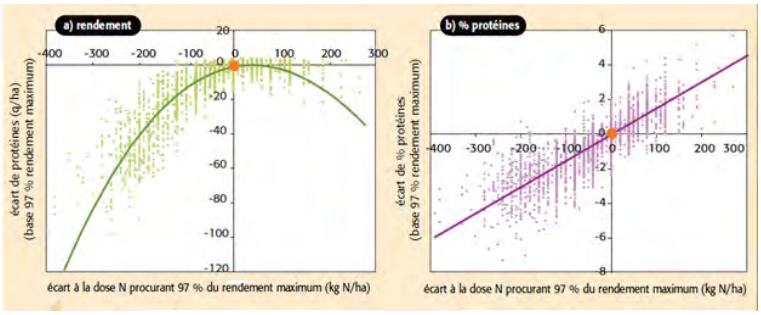
*Publié le 21 novembre 2013*

## « LES PRINCIPES »

Avec la parution il y a moins d'un mois des nouveaux arrêtés relatifs aux programmes d'actions « nitrate » 1, la gestion de l'azote à l'échelle de l'exploitation agricole est plus que jamais un sujet d'actualité. La fertilisation azotée constitue un pilier fondamental de cette gestion, puisqu'elle est la seule variable d'ajustement maîtrisable par l'agriculteur, dans un objectif d'équilibre des fournitures d'azote et des besoins des cultures. Pour atteindre cet objectif, le calcul de la dose prévisionnelle d'azote à apporter par les fertilisants peut s'appuyer sur la méthode du bilan. Cette méthode est retenue au niveau national dans le cadre des programmes d'actions « nitrate » comme l'outil de référence pour garantir l'équilibre de la fertilisation azotée.
Cet article de l'AgroReporter est le premier d'une trilogie consacrée à la méthode du bilan prévisionnel d'azote. Il en explique le principe (contexte, bases agronomiques et liste des postes) en grandes cultures. Les articles suivants s'intéresseront à deux postes en particulier, qui alimentent actuellement les débats dans la communauté agronomique : la minéralisation de la matière organique du sol et la fourniture d'azote par les produits organiques.

### L'azote : du grain à l'ozone

Le premier enjeu de la fertilisation est d'assurer la production agricole, aussi bien en quantité qu'en qualité. C'est particulièrement vrai pour l'azote, qui est très souvent le premier facteur limitant de production : un manque d'azote empêche d'atteindre l'objectif de rendement. Mais un excès d'azote n'est pas meilleur car il peut provoquer également des pertes de rendements (cas de la verse sur céréales par exemple). Il en va de même pour la qualité des productions, l'azote étant le principal constituant des protéines.

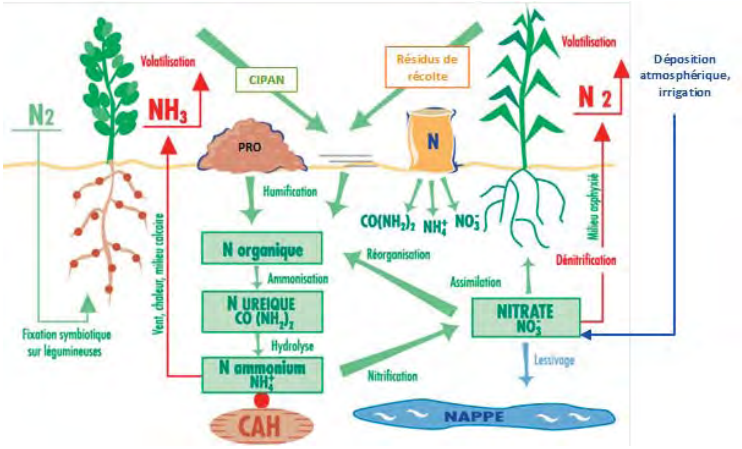

a) rendement
écart de protéines (q/ha) (base 97 % rendement maximum)
écart à la dose N procurant 97 % du rendement maximum (kg N/ha)
b) % protéines
écart de % protéines (base 97 % rendement maximum)
écart à la dose N procurant 97 % du rendement maximum (kg N/ha)

*Effet d'un excès ou d'un manque d'azote sur le rendement et la teneur en protéines du blé tendre (558 essais). Source: Laurent F et Makowski D (2007). Dose optimale d'azote sur blé : quels sont les effets du prix du blé et de l'engrais azoté ?, Perspectives Agricoles, n°339, p 46-50*

Le deuxième enjeu du raisonnement de la fertilisation azotée, qui n'est pas des moindres, est l'optimisation de l'efficience énergétique et économique des exploitations agricoles. Dans un contexte de hausse du prix des engrais, il est nécessaire de raisonner la fertilisation pour atteindre l'optimum économique.
Limiter les atteintes à l'environnement constitue le troisième enjeu de la fertilisation azotée. En plus des conséquences sur la qualité de l'eau (contexte nitrate), les fertilisants azotés peuvent également avoir un impact sur la qualité de l'air, par le biais de perte d'azote sous forme gazeuse. Ainsi l'oxyde nitreux (N2O), issu de la dénitrification du nitrate, contribuerait à 20 % de l'effet de serre global. Son effet est 300 fois supérieur à celui du CO2 ! Or l'agriculture et la sylviculture seraient responsables de plus de 80 % des émissions de N2O (source CITEPA, 2008). Par ailleurs, l'utilisation dans de mauvaises conditions d'engrais minéraux ou de produits organiques contenant de l'ammonium (NH4), peut conduire à la production d'ammoniac (NH3), qui est un précurseur de particules fines dangereuses pour la santé.

### L'azote vu du sol

La nécessité du raisonnement de la fertilisation azoté semble donc entendue, mais il reste à choisir la méthode la plus adaptée. Pour ce faire, il faut se baser sur les connaissances agronomiques, et entre autres sur ce qu'il est convenu d'appeler « le cycle (biogéochimique) de l'azote », qui représente les différentes formes d'azote et les transferts vus du point de vue du sol.




*Source : AGRO-Systèmes / SAS Laboratoire*

La plante assimile l'azote sous forme minérale dans la solution du sol, principalement l'ion nitrate (NO3-). Ce nitrate provient de différentes sources :

- Minéralisation de l'azote organique du sol, des résidus de récolte, des cultures intermédiaires (CIPAN), des produits résiduaires organiques (PRO), des retournements de prairies
- Apports atmosphériques, irrigation
- Fertilisants azotés

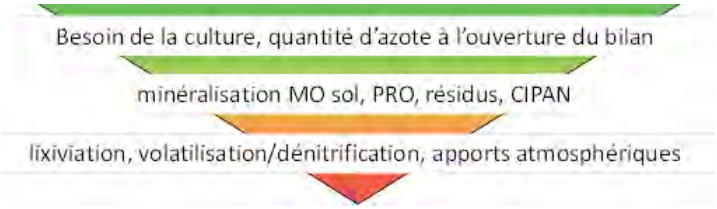
Citons également le cas particuliers de la fixation symbiotique d'azote atmosphérique par les légumineuses.
Le prélèvement par les plantes n'est pas le seul processus responsable de la sortie d'azote du système sol. Des pertes sont possibles par entrainement dans les eaux de drainage (lixiviation), lorsque le niveau des précipitations est supérieur à la réserve utile du sol et à l'évapotranspiration, ainsi que les pertes gazeuses dans certaines conditions (dénitrification / volatilisation).
Pour équilibrer la fertilisation azotée, il faut donc être capable d'estimer les différents flux d'azote à l'échelle du cycle cultural. C'est un des sujets de prédilection de la recherche agronomique, passée et actuelle. Les résultats des travaux ont permis de mieux comprendre ces phénomènes dynamiques, pour les intégrer dans une méthode de calcul opérationnelle : le bilan azoté prévisionnel.

### La méthode du bilan azoté prévisionnel

Cette méthode de raisonnement est basée sur le principe du bilan de masse, qui énonce que l'état final d'un système correspond à son état initial, additionné de ce qui est entré et soustrait de ce qui est sorti.
état final = état initial + entrées – sorties
Le bilan se définit donc sur une période donnée, avec une date d'ouverture et une date de fermeture du bilan.
Cette écriture a été adaptée au contexte de la fertilisation azotée :

- État final : quantité d'azote à la fermeture du bilan (récolte)
- Entrées : fournitures d'azote (engrais, minéralisation de la matière organique (MO) du sol, PRO, résidus de cultures, CIPAN, apports atmosphériques, …)
- Sorties : N absorbé par la culture, pertes d'azote (lixiviation, volatilisation / dénitrification)
- État initial : quantité d'azote à l'ouverture du bilan

La récolte est considérée comme l'état final (fermeture du bilan). L'état initial (ouverture du bilan) est plus délicat à choisir. Si la date d'implantation de la culture est le premier choix qui vient à l'esprit, il n'est pas forcément le plus judicieux. En effet, tous les postes du bilan ne sont pas connus avec la même précision.


Besoin de la culture, quantité d'azote à l'ouverture du bilan
minéralisation MO sol, PRO, résidus, CIPAN
lixiviation, volatilisation/dénitrification, apports atmosphériques

*Facilité croissante de mesure, calcul ou estimation des différents postes du bilan*

Si on considère que les apports atmosphériques compensent les pertes par volatilisation et/ou dénitrification, le poste le plus problématique à estimer est la perte d'azote dans les eaux de drainage (lixiviation) entre la récolte du précédent et la fin de la période de drainage. Elle va dépendre en grande partie du climat, du type de sol et du système de culture, et peut varier de 0 à plus de 60 kg/ha. De plus, même pour les cultures d'hiver, la majorité de l'absorption d'azote a lieu au printemps. L'ouverture du bilan s'effectue donc à la fin de la période de drainage, c'est-à-dire en sortie d'hiver.

L'optimisation de la fertilisation azotée consiste donc à équilibrer les entrées et les sorties, afin que l'azote minéral restant dans le sol à la récolte soit le plus faible possible. L'équation du bilan peut donc être écrite de manière à calculer la dose prévisionnelle d'azote :
Dose d'engrais azoté (dose X) = besoin de la culture – fournitures en azote

**Cette écriture simplifiée peut être détaillée avec les différents postes du bilan :**
Dose X = ( Pf + Rf ) - ( Pi + Ri + Mh + Mr + MrCi + Mpro + Mhp + Nirr )
**Avec :**
Pf : Quantité d'azote absorbé par la culture à la fermeture du bilan
Rf : Quantité d'azote minéral dans le sol à la fermeture du bilan (ou reliquat post-récolte)
Pi : Quantité d'azote absorbé par la culture à l'ouverture du bilan
Ri : Quantité d'azote minéral dans le sol à l'ouverture du bilan (ou reliquat sortie hiver)
Mh : Minéralisation nette de l'humus du sol
Mr : Minéralisation nette des résidus de récolte
MrCi : Minéralisation nette des résidus de culture intermédiaire (CIPAN)
Mpro : Minéralisation nette de l'azote organique des produits organiques
Mhp : Minéralisation nette due à un retournement de prairie
Nirr : Azote apporté par l'eau d'irrigation

La mesure du reliquat azoté (ou reliquat sortie hiver – Ri) permet de quantifier l'azote minéral à l'ouverture du bilan. Il s'agit du seul poste mesuré, tous les autres postes sont estimés ou calculés à l'aide de tables de référence ou de modèles. Ces postes dépendent des conditions pédoclimatiques et du système de culture. La collecte précise de ces informations est donc primordiale pour obtenir un conseil de dose d'azote adapté à la situation.

De nombreux postes du bilan sont dépendants du climat et du développement de la culture. La méthode du bilan délivre donc une dose prévisionnelle, qui ne constitue pas une garantie de rendement. Ce conseil pourra donc être modulé en cours de culture à l'aide d'outils d'ajustement de la dose, basés sur la mesure de l'état nutritionnel des plantes (par exemple JUBIL, N tester ou Farmstar). Ces méthodes sont donc complémentaires à la démarche du bilan, mais ne peuvent pas s'y substituer.

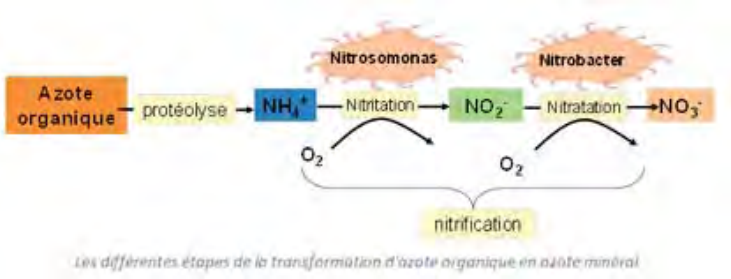
La description détaillée de tous les postes du bilan et des méthodes de calculs pour les différentes cultures se trouve dans la brochure azote éditée par le COMIFER. Les documents sont téléchargeables à l'adresse suivante : http://www.comifer.asso.fr/index.php/bilan-azote.html

*1 Arrêté du 23 octobre 2013 relatif aux programmes d'actions régionaux en vue de la protection des eaux contre la pollution par les nitrates d'origine agricole*
*Arrêté du 23 octobre 2013 modifiant l'arrêté du 19 décembre 2011 relatif au programme d'actions national à mettre en œuvre dans les zones vulnérables afin de réduire la pollution*

## LA MINÉRALISATION NETTE DE L'AZOTE ORGANIQUE DU SOL

### De l'organique au minéral : quand les bactéries font place nette

La minéralisation brute de l'azote est le passage de la forme organique à la forme minérale. Cette transformation peut être d'origine physico-chimique dans des conditions extrêmes (pH très faible et fortes températures). Dans nos régions tempérées, la minéralisation brute de l'azote est principalement due à la dégradation biologique (par les macro et micro-organismes) de la matière organique du sol. La première étape de ce processus, l'ammonification (ou protéolyse), concerne la conversion de l'azote organique en ammonium (NH4+) sous l'action de micro-organismes hétérotrophes qui utilisent des substrats carbonés comme source d'énergie. L'azote et le carbone sont également utilisés dans la constitution de la biomasse microbienne et des métabolites microbiens. En conditions non limitantes (pH et humidité pas trop faibles ni trop élevés), l'ammonium est converti

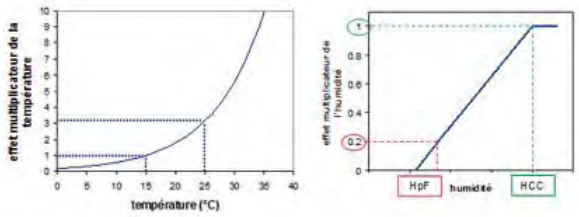



*Les différentes étapes de la transformation d'azote organique en azote minéral*

en nitrate ($NO_3^-$) par des bactéries autotrophes lors de la seconde partie du processus : la nitrification.
La minéralisation brute est toujours associée au phénomène d'organisation de l'azote minéral qui consiste à l'assimilation de l'azote minéral par les micro-organismes du sol pendant l'oxydation de substrats carbonés. Ce phénomène est aussi appelé « immobilisation » car, les plantes étant moins bonnes compétitrices que les micro-organismes pour l'azote minéral, elles ne peuvent accéder à l'azote incorporé dans la biomasse microbienne. Il peut engendrer un phénomène temporaire de "faim d'azote" pour la culture. Cet azote minéral immobilisé peut ensuite être remis à disposition des plantes lors du renouvellement de la biomasse microbienne du sol. Minéralisation brute et organisation sont étroitement liées et donc difficilement dissociables en conditions de champ.
La minéralisation nette d'azote est la différence entre la minéralisation brute et l'organisation, correspondant donc à la fourniture azotée du sol disponible pour la culture. (...)

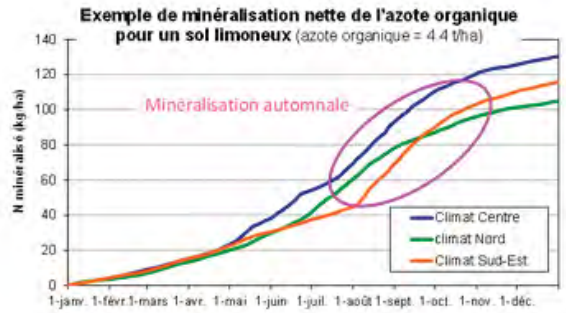
## Facteurs pédoclimatiques : un limon de Beauce sinon rien ?

Comme tout processus microbien, la minéralisation nette de l'azote organique est sous l'influence du climat (température et humidité). La minéralisation est la plus élevée en conditions chaudes et humides. Les modèles mécanistes utilisés aujourd'hui pour estimer cette minéralisation utilisent des relations telles que celles décrites dans les graphiques suivants.




*Effets température et humidité : la minéralisation est multipliée par 3 lorsque la température moyenne augmente de 10°C ; elle est divisée par 5 lorsque l'humidité du sol passe de la capacité au champ (HCC) au point de flétrissement (HpF)*

Plus que des différences entre les régions, c'est surtout la variation annuelle de la minéralisation qui est à prendre en compte. Les effets température et humidité se compensent en hiver (humidité élevée mais température faible) et en été (température élevée mais humidité faible), ce qui limite la minéralisation sur ces périodes. Le printemps et surtout l'automne sont donc les saisons les plus favorables à la minéralisation de l'azote organique. La minéralisation automnale peut représenter plus du tiers de la minéralisation annuelle, d'où l'intérêt d'avoir un couvert végétal à cette époque pour valoriser ce flux d'azote.


Exemple de minéralisation nette de l'azote organique
pour un sol limoneux (azote organique = 4.4 t/ha)
Minéralisation automnale
N minéralisé (kg/ha)
Climat Centre
climat Nord
Climat Sud-Est
1-janv. 1-févr. 1-mars 1-avr. 1-mai 1-juin 1-juil. 1-août 1-sept. 1-oct. 1-nov. 1-déc.

*Des climats très contrastés engendrent des variations d'azote minéralisé modérées pour un sol limoneux[2] (1.8% de matière organique) : 130 kg/ha/an pour un climat Centre, 115 kg/ha/an pour un climat Sud-Est et 105 kg/ha/an pour un climat Nord.*

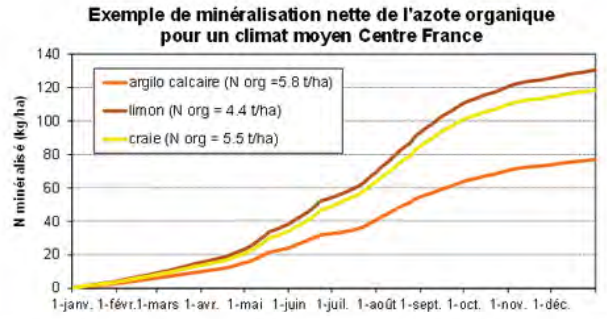
En plus du climat, les caractéristiques liées au type de sol vont fortement impacter sur la minéralisation nette d'azote (texture, statut acido-basique, teneur en azote organique).

L'argile forme des complexes avec la matière organique, ce qui a pour effet de la protéger physiquement de la dégradation par les micro-organismes. Il en va de même pour le calcaire qui forme des sortes de gangues autour des particules organiques. Ainsi les sols argileux et/ou calcaire possèdent naturellement des potentiels de minéralisation de l'azote organique plus faibles que des sols limoneux ou sableux.

Un autre paramètre de sol agit fortement sur la minéralisation nette de l'azote organique : le pH. En effet, la nitrification est très fortement inhibée pour des pH inférieurs à 5,5 ou trop élevés. Corriger l'acidité de son sol est ainsi un des leviers pour améliorer la dynamique des matières organiques.

La modélisation des effets de ces caractéristiques de sol a permis d'établir l'équation du K2, qui est le taux de minéralisation annuelle de la matière organique. Ce modèle, publié il y a près de 40 ans (Rémy et Marin-Laflèche, 1974), a connu de nombreuses évolutions suite aux différents travaux de recherche menés depuis, dont certains sont encore à venir 2.

Mais attention, le potentiel n'est pas tout ! En effet, la minéralisation nette de l'azote organique dépend également du stock d'azote organique à minéraliser. Sur les 25 premiers centimètres de sol, ce stock peut varier de moins de 4 t/ha pour des limons battants à plus de 8 t/ha pour des sables humifères. Par exemple, bien que son potentiel de minéralisation soit limité par la forte teneur en calcaire, une craie pourra fournir presqu'autant d'azote minéralisé qu'un limon moyen car son stock d'azote organique est généralement plus important.


Exemple de minéralisation nette de l'azote organique
pour un climat moyen Centre France
argilo calcaire (N org =5.8 t/ha)
limon (N org = 4.4 t/ha)
craie (N org = 5.5 t/ha)
N minéralisé (kg/ha)
1-janv. 1-févr. 1-mars 1-avr. 1-mai 1-juin 1-juil. 1-août 1-sept. 1-oct. 1-nov. 1-déc.

*Le type de sol impacte très fortement sur l'azote minéralisé (climat moyen Centre France)[1] : 75 kg/ha/an pour un argilo-calcaire, 120 kg/ha/an pour une craie et 130 kg/ha/an pour un limon.*

Le potentiel de minéralisation nette d'azote est donc propre à chaque type de sol et peu modifiable. Les pratiques culturales peuvent tout de même influer sur la minéralisation nette de l'azote, par le biais des restitutions organiques. Ainsi, exporter ses pailles et ne faire aucun apport organique peut réduire le potentiel de minéralisation de 20 %. A l'opposé, l'enfouissement des résidus de récolte, l'implantation de couverts et des apports organiques réguliers peuvent améliorer le potentiel de minéralisation de 20 %.

## C'est la culture qui décide !

Dans le cadre de la méthode du bilan azoté, la minéralisation nette de l'azote organique va donc se calculer en fonction du type de sol, du climat et de l'itinéraire cultural. Mais comme tout poste du bilan, il se calcule de l'ouverture (sortie hiver) à la fermeture du bilan (récolte). De plus, la période d'août à novembre présente la minéralisation nette la plus importante. Donc les cultures récoltées à l'automne bénéficieront de cette forte minéralisation, parfois au détriment de la maturation. Ce ne sera pas le cas pour les cultures récoltées en été.

*Exemple de poste Mh / Minéralisation nette d'azote organique du sol (kg/ha) - pour un reliquat au 15 février (climat Centre France)1*

| Culture | Date récolte | argilo-calcaire (N org = 5.8 t/ha) | Limon (N org = 4.4 t/ha) | Craie (N org = 5.4 t/ha) |
|---|---|---|---|---|
| Blé | 01-août | 36 | 63 | 58 |
| Maïs | 15-oct | 63 | 109 | 99 |

*Exemple de poste Mh / Minéralisation nette d'azote organique du sol (kg/ha) - pour un reliquat au 15 février (limon moyen avec N org = 4.4 t/ha)1*

| Culture | Date récolte | Climat Centre | Climat Nord | Climat Sud-Est |
|---|---|---|---|---|
| Blé | 01-août | 63 | 56 | 39 |
| Maïs | 15-oct | 109 | 86 | 91 |

Pour un même type de sol et un même climat, la minéralisation nette entre le reliquat et la récolte peut varier du simple au double. La culture est donc le facteur le plus important dans le calcul de ce poste!

***Pour conclure sur un point réglementaire, dans le cadre du programme d'action national à mettre en œuvre dans les zones vulnérables, afin de réduire la pollution des eaux par les nitrates d'origine agricole, des Groupes Régionaux d'Expertise Nitrates ont été créés par arrêtés préfectoraux. Ces GREN étaient chargés de proposer à chaque préfet de région les références techniques nécessaires à la mise en œuvre opérationnelle des mesures du programme d'actions «nitrates » au niveau régional. Chaque référentiel GREN peut ainsi présenter une variante plus ou moins importante du calcul du poste « minéralisation nette de l'azote du sol » présenté dans cet article. Si vous avez des questions à ce sujet, n'hésitez pas à nous contacter.***

***(...)***

# LA MINÉRALISATION NETTE DE L'AZOTE ORGANIQUE D'UN PRODUIT ORGANIQUE

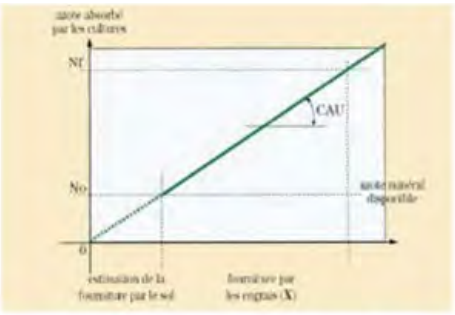
L'AgroReporter s'intéresse cette fois à un poste incontournable mais néanmoins difficile à mesurer : la fourniture d'azote minéral suite à l'apport d'un produit résiduaire organique (PRO).

L'absorption d'azote par la plante exclusivement sous forme minérale, nécessite la transformation préalable de la fraction organique de l'azote des PRO en azote minéral. Or cette minéralisation n'est pas complète à l'échelle du cycle de culture. Par conséquent, 1 kg d'azote organique apporté n'est pas égal à 1 kg d'azote minéral vis-à-vis de l'assimilation par la culture, aussi bien en terme de quantité d'azote « utilisable », qu'en terme de dynamique de fourniture à la plante. Pour raisonner la fertilisation azotée à l'aide de produits organiques, il est donc nécessaire d'estimer cette fourniture d'azote minéral à l'échelle de la période du bilan d'azote, représentée par le terme « équivalent engrais minéral efficace, Xa » dans les écritures opérationnelles du bilan prévisionnel d'azote du « Guide méthodologique du Comifer pour le calcul de la fertilisation azotée ».

## CAU, CRU, Keq : la cuisine des coefficients

Avant d'aborder la question de l'efficacité de l'azote pour l'absorption par la culture, quelle que soit la forme d'azote minérale ou organique apportée, il est nécessaire de rappeler que plusieurs notions sont d'usage dans ce domaine : CAU, CRU, Keq... Essayons de clarifier la situation, car il s'agit de ne pas les confondre !

- Le Coefficient Apparent d'Utilisation de l'azote (CAU) correspond à la fraction de l'azote total d'un fertilisant (minéral ou organique) qui est absorbée par les plantes jusqu'à la récolte. Ce coefficient s'obtient à partir d'essais au champ ou en vases de végétation au laboratoire. Un témoin non fertilisé est comparé à des modalités fertilisées avec l'engrais étudié à des doses croissantes. La mesure de l'azote exporté par la culture dans chacune des modalités permet de calculer le coefficient apparent d'utilisation, qui est la pente de la droite exprimant la variation de quantité d'azote absorbé par les plantes en fonction de la quantité d'azote apporté. Le CAU d'un engrais comme l'ammonitrate peut varier de 50 à 95 % suivant les conditions d'applications.




*Source : Guide de la fertilisation raisonnée : grandes cultures et prairies (C. Schvartz et al, 2005)*

- Le Coefficient Réel d'Utilisation de l'azote (CRU) est une notion voisine du CAU, la différence venant du mode d'obtention. Le CRU est obtenu à partir d'essais utilisant des engrais (minéraux ou organiques) marqués par un isotope non radioactif de l'azote : 15N. Le CRU se calcule comme le rapport entre la quantité azote marqué absorbé par les plantes et la quantité totale d'azote marqué apporté au sol. Le CRU nécessitant des méthodes expérimentales complexes, l'utilisation du CAU est plus répandue.

- Le Coefficient d'équivalence (engrais ammonitrate) de l'azote d'un PRO (KeqN) est le rapport entre le CAU de l'azote du PRO et le CAU de l'azote de l'ammonitrate. Ainsi, pour un produit organique donné :

**KeqN = CAU N organique / CAU N ammonitrate (sans unité)**

La méthode du bilan azoté utilise le KeqN car, le calcul du bilan prévisionnel étant réalisé pour calculer une dose de fertilisant azoté minéral de référence (l'ammonitrate), il est nécessaire d'exprimer l'efficacité d'un fertilisant organique en comparaison à ce fertilisant minéral de référence. En pratique, le coefficient d'équivalence (KeqN) correspond à la quantité d'azote de l'ammonitrate, apporté selon les modalités propres à la fertilisation minérale, qui a le même effet sur l'alimentation azotée des plantes que 1 kg d'azote apporté par le produit organique.

L'effet direct des produits organiques est estimé en tenant compte de la quantité de produit épandue, de la teneur en azote organique de ce produit et du KeqN.

Ainsi, en reprenant l'écriture du guide méthodologique du Comifer, l'effet direct du produit s'écrit : **Xa = %Npro x Q x KeqN**

Avec :

- %Npro : teneur en azote total du produit (en % par untité de volume ou de masse)
- Q : volume ou masse épandue/ha
- KeqN : coefficient d'équivalence engrais N minéral efficace

## Recette du Keq

Des valeurs de KeqN sont proposées pour un certain nombre de PRO dans le guide méthodologique du Comifer (cliquer ici pour accéder aux KeqN de ce Guide). Elles dépendent de la période d'épandage, des modalités d'apport, du type de culture (printemps / hiver) et, bien sûr, du type de produit organique. Deux types de KeqN sont proposés :

- KeqN Cycle : c'est le KeqN le plus souvent référencé (à partir de mesures réalisées au champ à la récolte de la culture). Il globalise l'effet azote à l'échelle du cycle entier de la culture quelle que soit la période d'apport du PRO. Ce KeqN est utilisé dans les méthodes de calcul basées sur l'écriture CAU,
- KeqN Bilan : c'est la part de l'effet azote du PRO pendant la période du bilan, après la date d'ouverture. Ce KeqN est utilisé dans la méthode du bilan prévisionnel.

Mais le référencement au champ des KeqN, lourd à mettre en œuvre, présente quelques limites :

- il est difficile de référencer au champ tous les types de PRO,
- les KeqN ainsi référencés ne permettent pas d'estimer correctement la fourniture d'azote par le PRO en cas d'épandage avant l'ouverture du bilan.

On fait alors appel à une méthode de laboratoire pour estimer la part de l'azote organique d'un PRO qui sera disponible pour la culture sur une période donnée (bilan ou cycle) : la cinétique de minéralisation de l'azote. Cette méthode normalisée1 consiste à mesurer, en conditions contrôlées de laboratoire, la minéralisation de l'azote organique d'un produit organique incorporé à de la terre. Pour plus d'informations sur cette méthode, relire « Les PRO font leur CINEma » du 24 mai 2013 de l'agroReporter.

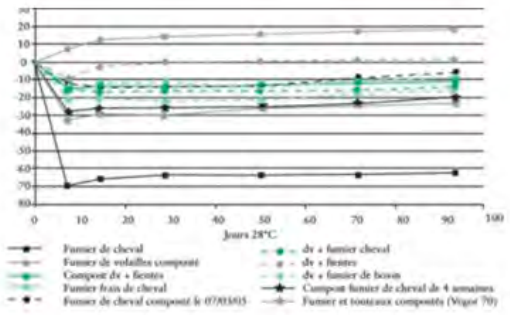
Comme nous sommes en système clos sans plante, la variation de stock d'azote minéral mesurée à différentes dates correspond à la minéralisation / immobilisation de l'azote organique.

Les résultats issus de ce test de laboratoire doivent cependant être maniés avec précaution. Ils ne peuvent pas être utilisés « tels quels » pour estimer le KeqN d'un PRO. Nous reviendrons sur ce sujet plus loin. De plus, les conditions expérimentales de ce test d'incubation diffèrent des conditions d'épandage et, pour certains PRO, la minéralisation n'est pas forcément terminée à l'issue des 91 jours d'incubation de la norme utilisée par les laboratoires.

Les coefficients obtenus à partir d'essais au champ ou en incubation peuvent varier de moins de 5 % à plus de 70 %. Pour certains produits, dont la minéralisation entraîne une immobilisation de l'azote du sol, la minéralisation nette peut même être négative. La figure suivante illustre cette variabilité des cinétiques de minéralisation de l'azote organique.

(...)

(...)


Jours 28°C
Fumier de cheval
Fumier de volaille composté
Compost de + fientes
Fumier frais de cheval
Fumier de cheval composté
Compost fumier de cheval de 4 semaines
Fumier et tourteaux composés (Végetal 70)

*Azote minéralisé en % du N organique du produit pour quelques amendements organiques*
*Source : Une meilleure connaissance des engrais et amendements utilisés en Bio*
*(C Raynal, N Nicolardot, in Alter Agri n°79,sept-oct 2006)*

Le reste de l'azote organique n'est pas « perdu » pour autant, puisqu'il va s'incorporer au stock d'azote organique du sol récepteur et ainsi augmenter progressivement la fourniture d'azote par minéralisation de la matière organique du sol. Cet effet est pris en compte dans la méthode du bilan azote par l'effet système (arrière effet ou effet résiduel des apports organiques).

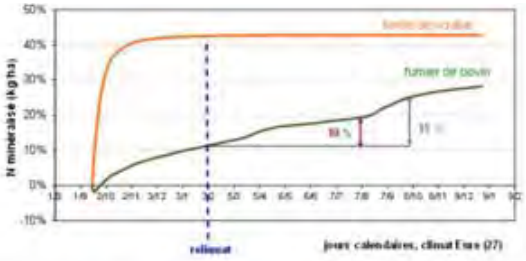
## Ne pas oublier la fraction minérale

L'azote organique minéralisé estimé à partir de cinétiques mesurées au laboratoire, auquel s'ajoute l'azote minéral initial du PRO, permettent d'estimer la quantité d'azote du PRO disponible pour la culture. Toutefois il s'agira toujours d'une estimation par excès car une part de l'azote minéral peut être perdue par voie gazeuse ou par lixiviation. Il est donc toujours utile de connaître la répartition des différentes formes d'azote d'un PRO. Ainsi, même si l'azote minéral représente moins de 10 % de l'azote total pour la majorité des produits organiques, cette proportion peut dépasser les 50 % pour certains produits comme les lisiers. Dans ce cas, l'azote minéral doit être pris en compte dans la fourniture d'azote par le produit organique, uniquement pour les apports post reliquats (sur culture de printemps).

## Interprétation des cinétiques de laboratoire et Keq

L'utilisation de la cinétique de minéralisation d'azote permet de calculer la quantité d'azote minéralisé au cours de la période bilan (KeqN Bilan). L'allure de la cinétique sera donc primordiale. Par exemple, bien que le coefficient de minéralisation d'une fiente (40-45%) soit supérieur à celui d'un fumier de bovin (25-30 %), l'azote restant à minéraliser sur la période du bilan azoté sera supérieur pour le fumier de bovin dans le cadre d'un apport d'automne. La minéralisation de la fiente est certes plus importante en proportion mais aussi plus rapide : tout se minéralise à l'automne, il ne reste donc quasiment rien à minéraliser entre le reliquat et la récolte. Cet azote minéralisé à l'automne peut soit :

- se retrouver dans le reliquat
- avoir été absorbé par la culture (dans le cas du colza ou du blé par exemple)
- avoir été absorbé par une culture intermédiaire (CIPAN)
- être lessivé (surtout en l'absence de CIPAN)




*Cinétiques de minéralisation d'une fiente de volaille et d'un fumier de bovin épandus le 15 septembre pour un climat Centre France (paramétrage Azo-LIS®, source SAS Laboratoire). Pour le fumier de bovin, l'azote restant à minéraliser dans le cadre du bilan est de 10 % pour une récolte en août et 15 % pour une récolte en octobre. Pour la fiente de volaille, l'azote restant à minéraliser entre le reliquat et la récolte est inférieur à 0,5 %.*

Ainsi « l'effet direct » d'un produit organique dans le bilan azoté dépend de l'allure de la courbe, de la date d'apport mais également de la culture.
Le climat peut également avoir une influence sur cette minéralisation, mais dans des proportions très modérées.

**A retenir !**

La première étape, pour évaluer l'effet direct d'un produit organique est de bien connaître sa concentration en azote total (organique et minéral). Les teneurs en azote total peuvent présenter une dispersion importante autour de la composition moyenne pour un type de produit donné. Il est donc toujours préférable de disposer de mesures réalisées sur le produit à épandre (sous réserve d'un bon échantillonnage). Les paramètres à demander au laboratoire sont au minimum : teneur en matière sèche, teneur en carbone (ou matière organique), teneur en azote total, teneur en azote minéral (azote ammoniacal essentiellement).

***Pour conclure sur un point réglementaire, la prise en compte de l'effet des produits organiques dans le bilan azote peut différer assez fortement entre les référentiels GREN, avec notamment des écarts sur les coefficients d'équivalence. Si vous avez des questions à ce sujet, n'hésitez pas à nous contacter.***

*Pour aller plus loin :*

- TROCHARD Robert, BOUTHIER Alain, MORVAN Thierry, Jean GRALL, 2011, Valeur azote à court, moyen et long terme des produits résiduaires organiques issus d'élevage, Congrès COMIFER-GEMAS - 23 & 24 nov. 2011 - Reims, France
- BOUTHIER Alain et TROCHARD Robert, 2012, Fertilisation azotée - Mieux intégrer les apports organiques dans les calculs de doses, Perspectives Agricoles n°386

*1 XP U44-163 (décembre 2009) Amendements organiques et supports de culture - Caractérisation de la matière organique par la minéralisation potentielle du carbone et de l'azote*
*XP U42-163 (septembre 2012) Engrais - Caractérisation d'un engrais organique ou organo-minéral par la minéralisation potentielle de l'azote*

# L'AGRONOME ET LE PHOSPHORE

*Publié le 28 avril 2011*

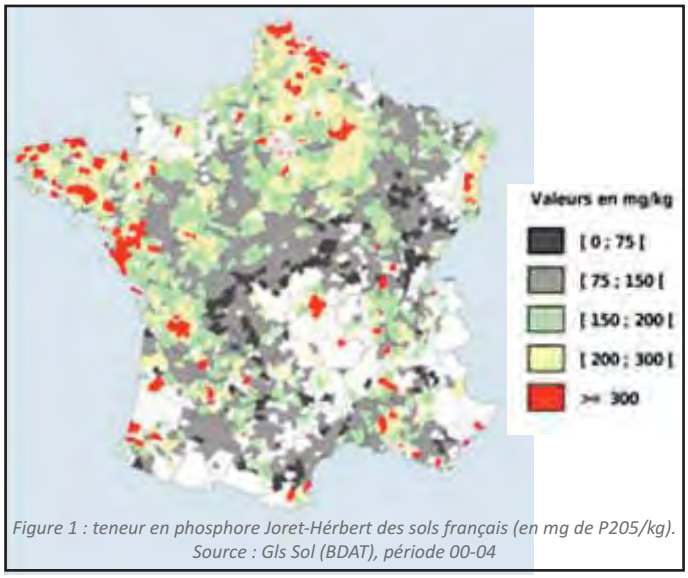



*Figure 1 : teneur en phosphore Joret-Hérbert des sols français (en mg de P205/kg). Source : Gis Sol (BDAT), période 00-04*

Les impasses en phosphore ne sont plus rares aujourd'hui en grande culture. Elles ne sont pourtant pas toujours sans conséquence. Des baisses de rendement, bien que non systématiques, peuvent être observées après plusieurs années d'impasse. Pourtant cet élément est l'un des constituants majeurs de la croûte terrestre. Les quantités totales de phosphore des sols français sont de l'ordre de 10 000 kg/ha, soit en moyenne 200 fois supérieures aux besoins des plantes cultivées. Malgré tout, plus de la moitié des sols cultivés en France ont des réserves limitées en phosphore dit assimilable (Figure 1). Pourquoi ce stock de phosphore n'est-il pas plus utilisable par les végétaux ? Partant du constat que dressait Ph. Duchaufour en 1997 que «le problème de la nutrition en phosphore est bien souvent lié à celui de la mobilisation des réserves », comment mesurer la capacité d'un sol à subvenir aux besoins des cultures ? D'ailleurs, disposons-nous d'outils de mesure efficaces ?

## UNE DYNAMIQUE COMPLEXE

Le phosphore est indispensable à la vie végétale, surtout en début de végétation et dans les organes jeunes. Elément constitutif des tissus, il joue aussi un rôle important dans la synthèse et le métabolisme des glucides et se concentre dans les organes reproducteurs. Il semble que la plante absorbe surtout le phosphore sous la forme monovalente de l'ion phosphate H2PO4-, qui diminue lorsque le pH augmente ; ceci explique les difficultés de nutrition en phosphore rencontrées en sol basique.

## UNE DYNAMIQUE COMPLEXE

Le phosphore est indispensable à la vie végétale, surtout en début de végétation et dans les organes jeunes. Elément constitutif des tissus, il joue aussi un rôle important dans la synthèse et le métabolisme des glucides et se concentre dans les organes reproducteurs. Il semble que la plante absorbe surtout le phosphore sous la forme monovalente de l'ion phosphate H2PO4-, qui diminue lorsque le pH augmente ; ceci explique les difficultés de nutrition en phosphore rencontrées en sol basique.

Dans le sol, le phosphore a pour seule origine l'apatite, roche dans laquelle il se trouve associé au calcium. Au cours du processus d'altération et de formation des sols, les ions phosphate des apatites sont libérés par dissolution et peuvent être :

- absorbés par les plantes ou des microorganismes et intégrés aux matrices organiques. A la mort de ces organismes, le phosphore est reminéralisé et se trouve de nouveau sous des formes assimilables
- incorporés au complexe argilo-humique, sous une forme plus ou moins assimilable
- rétrogradés en une nouvelle forme cristallisée et insoluble, dans les sols très acides (phosphate d'aluminium ou de fer) ou au contraire en milieu calcaire (phosphates tricalciques associés au calcaire actif). Le pH optimum de mobilisation des réserves en phosphore se situerait entre 5,5 et 6.

La plante s'alimente à partir des ions phosphate dissous dans la phase liquide interstitielle du sol, ou solution du sol. En raison des phénomènes d'absorption par les organismes vivants, de fixation sur le complexe argilo-humique et de rétrogradation, associés à une faible mobilité des ions phosphate, le phosphore se trouve en quantité relativement faible dans la solution du sol. Mais cette dernière est alimentée en permanence par la part fixée par le sol à travers une cinétique complexe. Finalement, alors que la solution du sol ne contient que 0,1 à 0,4% du phosphore total du sol, elle fournit plus de 80% du prélèvement de cet élément par les végétaux, grâce à la diffusion des ions phosphate présents sur la phase solide du sol (Fardeau et Conesa, 1994).

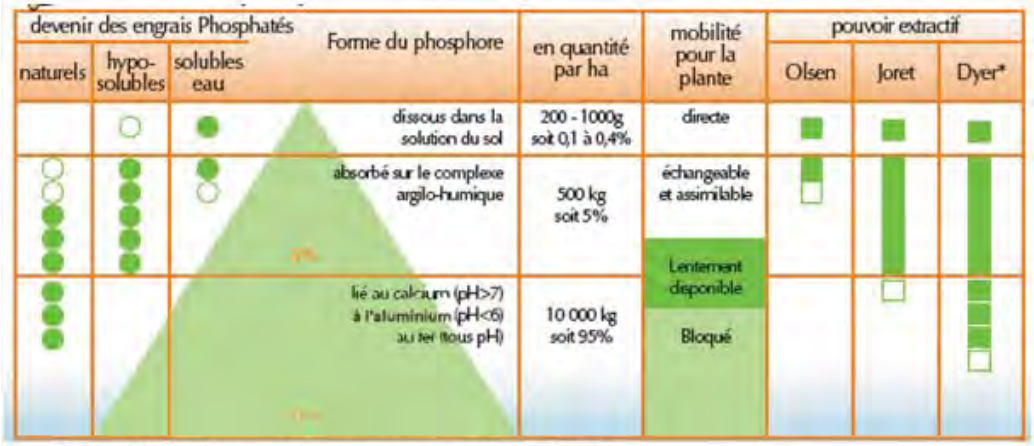



Figure 2 : les différentes formes du phosphore dans le sol (Source : GEMAS)

[...]



P.22

[...]

## MÉTHODES D'ANALYSES, AU SECOURS !

L'agronome ne s'intéresse pas au phosphore total du sol (qui se trouve à 95% sous des formes totalement inassimilables par les végétaux), mais essaye d'approcher le phosphore disponible en utilisant des méthodes censées reproduire ce que la racine est capable de faire (et qui vont différer selon les techniques d'extraction).

Différents réactifs d'extraction ont été proposés depuis la fin du 19è siècle. Ces différentes méthodes, encore utilisées aujourd'hui, tentent de répondre aux besoins d'estimation du phosphore assimilable sur différents types de sols et pour différentes espèces végétales, essences forestières comprises (Tableau 1).

*Tableau 1 : présentation de quelques méthodes d'analyse du phosphore assimilable (Baize, 2000)*

| Méthode | Date | Réactif d'extraction | Validité |
|---|---|---|---|
| **Dyer** | 1894 | Acide citrique 2% à pH = 2 | Satisfaisante en sols acides ou neutres |
| **Truog** | 1930 | Acide sulfurique + sulfate d'ammonium à pH = 3 | Satisfaisante en sols argileux et calcaires ou issus de roches cristallines |
| **Olsen** | 1954 | Bicarbonate de sodium à pH = 8,5 | Bonne pour une large gamme de sols |
| **Bray 1** | 1954 | Fluorure d'ammonium + acide chlorhydrique | Très bonne pour sols acides |
| **Joret-Hébert** | 1955 | Oxalate d'ammonium en milieu neutre | Satisfaisante pour sols calcaires |
| **Duchaufour et Bonneau** | 1959 | Acide sulfurique (2 fois) puis soude | Sols forestiers |

## LE LABORATOIRE LCA PROPOSE CINQ MÉTHODES DE DOSAGE

Phosphore Joret-Hébert : pour tout type de sol, et utilisée par défaut, lorsque aucune méthode de dosage n'est spécifiée. Très utilisée en France, la plupart des références régionales utilisent cette méthode.

> **Phosphore Dyer :** uniquement pour les sols acides. Cette méthode de dosage est utilisée pour les sols de Vendée, de Bretagne, de Corse…

> **Phosphore Olsen** : méthode la plus utilisée dans le monde, de plus en plus pratiquée en France ; elle essaye d'approcher la part la plus soluble du phosphore et apparaît la mieux adaptée aux sols alcalins. Bien adaptée aussi aux sables humifères des Landes.

> **Phosphore total** (extrait aux acides forts) : pour les sols truffiers et historiquement pour les sols viticoles.

> **Phosphore de la solution du sol** : de nombreux travaux (par exemple à l'INRA de Bordeaux) essayent de mieux appréhender le phosphore soluble ; pour l'instant, il s'agit d'un extrait à l'eau.

Selon le réactif d'extraction, les quantités de phosphore extraites varient. Voici comment se classent les teneurs en phosphore mesurées dans les sols avec ces différentes méthodes :

**P soluble dans l'eau <<< P Olsen << P Joret-Hébert < P Dyer <<< P total.**

Il existe plusieurs autres méthodes, moins diffusées ou encore à l'étude. En fait, cette multiplication des techniques met bien en évidence la difficulté de compréhension des mécanismes d'assimilation du phosphore par la plante. Contrairement au potassium ou à l'azote dont le passage dans la racine est relativement passif, les prélèvements de phosphore nécessitent une participation racinaire active et liée à la vie du sol (mycorhizes…). La porosité du sol et sa qualité biologique, l'état du système racinaire, sont autant d'éléments dont il faut tenir compte (avec le pH du sol) pour interpréter les capacités de mobilisation du phosphore d'une parcelle.

## COMMENT INTERPRÉTER LES RÉSULTATS ?

Etant donnée la dynamique du phosphore, l'interprétation des résultats d'analyses n'est pas toujours évidente, mais elle est possible… à condition de disposer d'informations complètes sur l'historique de la parcelle ! Le raisonnement de la fertilisation phosphatée au Laboratoire LCA utilise le logiciel REGIFERT, développé par l'INRA, de type Comifer.

Il prend en compte le niveau d'exigence en phosphore de la culture. En effet une teneur en phosphore assimilable dans le sol de 200 mg de P2O5 Joret-Hébert /kg peut être satisfaisante pour un blé tendre, mais nécessitera un complément pour un colza.

L'interprétation du résultat d'analyse donne également une place importante au sol, en intégrant l'appréciation du pouvoir fixateur du sol vis à vis du phosphore, la capacité d'exploration du sol par les racines et le passé récent de fertilisation (impasse ou non). Ce raisonnement intègre également le devenir des résidus de cultures ainsi que le prélèvement maximal de la plante pour pouvoir réaliser son cycle complet de développement sans perte de rendement. Certains facteurs, tels la mycorhization des racines, sont cependant ignorés, alors qu'ils peuvent fortement contribuer à l'assimilation du phosphore, en augmentant considérablement le volume de sol exploré et en optimisant l'absorption d'éléments nutritifs. Selon les spécialistes, près de 95% des végétaux bénéficient de cette association avec un champignon, dont les plantes cultivées (vigne, grandes cultures, arboriculture). Le colza et la betterave font partie des rares espèces non mycorhizées.

## COMPLÉTER EFFICACEMENT L'OFFRE EN PHOSPHORE DU SOL

Les engrais ont pour fonction principale d'apporter aux plantes des éléments directement utiles à leur nutrition, quand le sol n'est pas capable de les fournir au bon moment. En ce qui concerne le phosphore, on utilise différentes solutions d'extraction pour apprécier sa solubilité dans les engrais : eau, citrate d'ammonium neutre ou alcalin, acide formique.

La solubilité dans les réactifs d'extraction est utile pour adapter le type d'engrais aux caractéristiques du sol et aux modalités d'apport :

**Sols acides et très acides** : engrais peu solubles (type phosphates naturels) ; un complément sous forme très soluble peut cependant être effectué au printemps pour soutenir la végétation

**Sols basiques** : engrais très solubles (type superphosphates triples, MAP, DAP…) ; attention par contre à la forte salinité de ces produits et à leur agressivité sur la flore végétale et animale du sol.

**Autres sols** : la plupart des engrais présents sur le marché sont utilisables, sauf les moins solubles.

[...]

[...]

L'utilisation de produits résiduaires organiques (boues de stations d'épuration, composts, effluents d'élevage, …) est également une source phosphatée qu'il ne faut pas négliger. Le dosage du phosphore total apporté par ces matières constitue une première information utile mais l'analyse chimique simple ne suffit pas à évaluer la disponibilité du phosphore avec précision. D'autres approches complémentaires, comme les tests spécifiques de biodisponibilité par exemple, peuvent alors être mises en œuvre en laboratoire.

## EXIT L'EFFET « VIEILLE GRAISSE »

Cet effet, selon lequel les apports anciens d'engrais sont mieux utilisés par la culture que les apports récents, n'est observé que de façon exceptionnelle. On conseille aujourd'hui, étant donnée la difficulté à mobiliser les réserves de phosphore du sol, d'apporter le phosphore au plus près des besoins et au plus près des racines. Corollairement on considère qu'il n'est plus nécessaire d'entretenir des teneurs élevées en phosphore dans les sols, inutiles et préjudiciables en terme environnemental (eutrophisation…).
Quant aux apports par voie foliaire, leur efficacité nutritionnelle est très discutée, en grande culture comme en viticulture, arboriculture ou maraîchage. Ils doivent être considérés davantage comme des apports de correction, c'est-à-dire comme un complément des apports au sol dans des conditions particulièrement défavorables (enracinement, concurrence … pouvant entraîner une déficience de l'absorption racinaire). Par contre ces apports foliaires pourraient présenter une action mécanique, sur pommes notamment.



P.24

# UN K PARTICULIER

*Publié le 12 mai 2011*

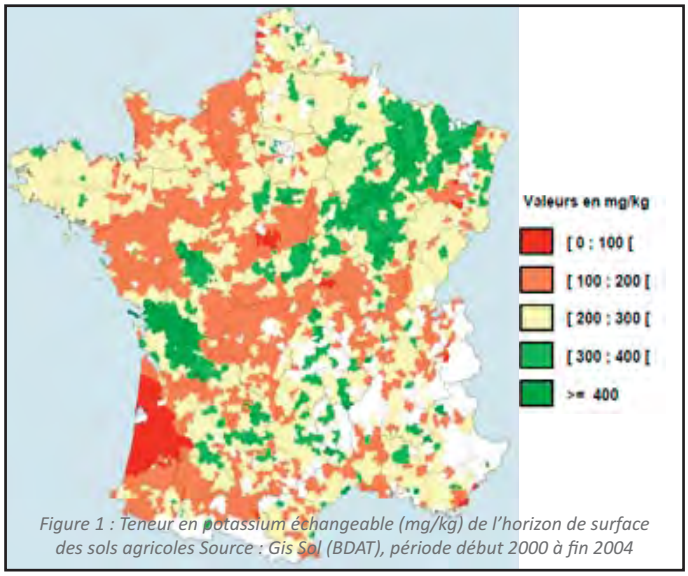



*Figure 1 : Teneur en potassium échangeable (mg/kg) de l'horizon de surface des sols agricoles Source : Gis Sol (BDAT), période début 2000 à fin 2004*

Bien qu'il ne tienne pas souvent le devant de la scène, le potassium est un acteur de premier plan. Seul élément majeur n'intervenant pas dans les fonctions structurales ou plastiques du végétal, il est par contre indispensable au fonctionnement même de la plante :

- **maintien des équilibres électriques et de l'hydratation cellulaire :** alimentation en eau, migration des glucides issus de la photosynthèse, régulation de l'azote…
- **activation de la plupart des cycles enzymatiques** : activation des réactions chimiques

Cet élément indispensable à la croissance et au développement des plantes, permet donc à la fois des synthèses dans les cellules, des transports entre cellules végétales, la régulation de l'eau dans la plante, la résistance au stress…

## LE POTASSIUM DANS LE SOL

**Dans le sol, le potassium se trouve sous quatre principaux états :**

- **Le potassium non échangeable** : lié aux minéraux silicatés (de type mica et feldspath), aux argiles proches des micas (argiles de type illite), c'est la forme majoritaire. Cette forme constitue une réserve utilisable à long terme ; le potassium est libéré progressivement par l'altération des minéraux, sous l'effet de l'activité biologique des sols (« attaque » des racines, de leurs sécrétions, de leurs mycorhizes, action du climat… ). Directement liées à la nature minéralogique des sols, les teneurs en potassium non échangeable sont forcément très variables dans les sols français. Par voie de conséquence, les teneurs en potassium échangeables suivent aussi ces variations (Figure 1).

- **Le potassium à l'intérieur des réseaux cristallins** : les argiles dont les feuillets ont la capacité de s'écarter et de se rétracter dans certaines conditions (hydratation, apport de chaux…), permettent aux cations K+ situés à leur surface de se fixer à l'intérieur des feuillets, sous une forme non échangeable. Ce phénomène, appelé « rétrogradation » est observé pour les micas, illites, vermiculites, smectites, et est réversible. Ces argiles présentent un fort pouvoir fixateur vis-à-vis du potassium, mais elles peuvent aussi en restituer sous une forme échangeable.

- **Le potassium adsorbé :** c'est la forme facilement utilisable, à l'état d'ions K+ dans la solution du sol ou adsorbés sur le complexe argilo-humique. L'équilibre entre le potassium de la solution du sol et celui qui est adsorbé sur le complexe d'échange cationique constitue le potassium échangeable ou assimilable.

- **Le potassium renfermé dans les matières organiques :** les plantes, après avoir prélevé et absorbé le potassium pour leur maturation, excrètent ensuite celui-ci, contenu dans leurs sucs, par leurs racines et par leurs feuilles. Après leur mort, la décomposition des résidus végétaux libère encore des cations K+ : c'est la minéralisation primaire.

Bien que présent dans le sol sous plusieurs formes, le potassium n'est assimilé par les végétaux que sous la forme ionique K+. La proportion de K+ échangeable est finalement infime (1 à 2 % du potassium total), tant dans la solution du sol que sur le complexe argilo-humique, par rapport aux autres formes naturellement présentes dans le sol : plus de 99 % de cette forme K+ est adsorbée sur le complexe, et une quantité minime se trouve en solution.

Des échanges entre la phase solide et la phase liquide (solution) du sol ont lieu en permanence, permettant le prélèvement de cet élément par les racines. On estime que seulement 10 à 20% de la nutrition des cultures est assurée à partir du K+ échangeable (en solution et adsorbé). Le reste des besoins de la plante en potassium est donc assuré par les autres sources disponibles (libération par les matières organiques, par l'écartement des feuillets d'argile, par l'altération des minéraux silicatés potassiques).

## L'ANALYSE DE TERRE ET SON INTERPRÉTATION

Tout comme pour le phosphore, la fertilisation potassique ne se raisonne pas à partir de la teneur totale en potassium du sol, mais par une approche d'élément disponible : ainsi, le potassium est dosé au laboratoire, après une extraction par une solution d'acétate d'ammonium, par spectrométrie (norme NF X31-108). Cet extractif est censé reproduire le fonctionnement des racines et représenter la part de potassium extractible par les plantes.

Le principe de raisonnement de la fertilisation potassique est le même que celui de la fertilisation phosphatée. Au LCA, partant d'une approche de type Comifer, quatre critères principaux sont pris en compte pour le calcul d'une dose d'apport, ou proposer un conseil d'impasse le cas échéant :

- L'exigence des cultures (définissant des seuils d'impasse) : les espèces cultivées ont des sensibilités différentes à la carence en potassium : par exemple, la betterave et la pomme de terre sont beaucoup plus exigeantes en potassium que le blé ou l'orge. Ainsi, une teneur de potassium échangeable dans un sol de 150 mg/kg peut être satisfaisante pour un blé tendre, mais nécessitera un complément pour un colza
- La teneur du sol en potassium échangeable (mesurée par l'analyse de terre)
- Le passé récent de fertilisation (impasses ou non pendant les 3 dernières années)
- La gestion des résidus de culture du précédent (enfouis ou exportés)

Là encore, une place importante est donnée au sol, en intégrant l'appréciation du pouvoir fixateur du sol vis à vis du potassium, la capacité d'exploration du sol par les racines et le passé récent de fertilisation.

[…]

[...]
Le potassium est un élément mobile, donc susceptible de migrer dans les horizons plus profonds, ainsi que d'être entraîné en dehors de la parcelle (pertes par lessivages importantes en sol sableux). Cet aspect, lié à la texture du sol, est aussi pris en considération dans l'interprétation de l'analyse.

## COMPLÉTER EFFICACEMENT L'OFFRE EN POTASSIUM DU SOL

Le choix de la dose et du fractionnement de la fertilisation potassique doit tenir compte de quelques données agronomiques de base et du climat :

- **la texture du sol :** sur un sol filtrant, par exemple, les risques de lessivage seront beaucoup plus importants et obligeront souvent à fractionner les apports de potassium pour limiter les pertes et optimiser les apports.

- **la richesse cationique du sol :** les risques de moindre efficacité du potassium apporté seront beaucoup plus élevés en sol saturés en calcium ou magnésium.

- **le niveau de fumure azoté :** l'azote et le potassium ayant un rôle inverse dans le végétal, le rapport N/K2O de la fertilisation (à moduler selon les stades physiologiques) est à la base de la construction d'un plan de fertilisation, surtout en maraîchage et arboriculture.

- **la pluviométrie** (ou la présence d'un système d'irrigation) : les prélèvements nutritionnels et le transport des minéraux se faisant dans un milieu aqueux, tous les éléments seront pénalisés par un manque d'eau. Le potassium, dont l'assimilation est dite passive (c'est à dire très liée au niveau et à la régularité du flux hydrique dans le végétal) est particulièrement pénalisé en sol sec. A l'inverse, dans les situations de pluviométrie élevée, cet élément mobile peut se trouver entraîné en profondeur limitant l'efficacité de l'apport.

Même si le potassium est indispensable au végétal, une surfertilisation peut être néfaste pour la culture, par phénomènes d'antagonisme, selon divers mécanismes :

- antagonisme par concurrence ionique : une augmentation de la concentration de la solution du sol en potassium induit une augmentation d'absorption de potassium par la racine au détriment du magnésium et du calcium. De même, un excès de disponibilité en potassium accentue les phénomènes chlorotiques en sols sensibles en limitant la disponibilité du fer et manganèse.

- appauvrissement du complexe par déplacement d'ions : les ions K+ en excès prennent la place des ions Ca2+ et Mg2+ sur le complexe argilo-humique. Ces derniers sont alors exposés au lessivage : c'est l'action décalcifiante et antimagnésienne des engrais potassiques ;

Il faut de plus noter le phénomène d'absorption sélective des ions par les racines : les végétaux semblent « préférer » les ions K+ aux ions Ca2+.

## BIEN CHOISIR SON ENGRAIS POTASSIQUE

Les engrais ont pour fonction principale d'apporter aux plantes des éléments directement disponibles pour leur nutrition, quand le sol est déficient.

Pour pouvoir être mis sur le marché, ils doivent répondre à une norme française (par exemple NF U 42-001 pour les engrais minéraux simples et composés, engrais organiques simples et composés, engrais organo-minéraux composés) ou être conformes au règlement européen (CE) n° 2003/2003, et contenir plus de 3 % d'un élément majeur (N, P2O5 ou K2O).

Un certain nombre d'informations doit être précisé sur l'étiquette du produit, comme la teneur en masse des différents éléments fertilisants présents, les formes présentes et la solubilité associée.Les engrais potassiques sont de plusieurs natures (sels de potasse seuls ou en mélange / association engrais P naturels + solution K / Patenkali...) et on utilisera l'engrais adapté aux besoins : engrais binaires P-K, engrais ternaire N-P-K ... Parmi les engrais composés, il existe une multitude de dosages possibles, selon les marques, et leur choix dépendra des usages prévus.

Les engrais potassiques ont tous la même efficacité du point de vue du potassium : le choix s'effectuera plutôt selon la nature de l'anion associé (sulfate ou chlorure par exemple) : pour les productions sensibles au chlore (petits fruits rouges, fraisiers, haricots, melons...), la mention "pauvre en chlore" (moins de 2% de chlore Cl) garantit l'absence de chlorure de potassium.

En complément, la marque SK indique que le potassium est exclusivement sous la forme de sulfate de potassium dans l'engrais composé et apporte du soufre directement assimilable.

Le chlorure de potasse présente, par ailleurs, un indice de salinité 2 à 3 fois plus élevé que le nitrate ou le sulfate de potasse ; il sera donc à éviter dans la majorité des sols à risque de salinité ou pour les cultures sensibles.

L'utilisation de produits organiques (boues de stations d'épuration, composts, effluents d'élevage, ...) est également une source importante de potassium à ne pas négliger. Contrairement à l'azote ou au phosphore dosés dans ces produits organiques, la disponibilité en K2O est supposée totale, le potassium ne passant pas par la phase organique du sol.

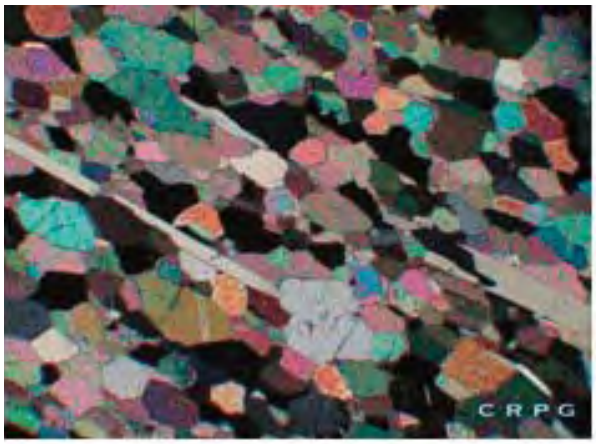
Certains produits résiduaires, comme les cendres, peuvent être particulièrement riches en potasse. Elles lui ont même donné leur nom : en allemand Pottasche vient de Pott (Pot) et de Asche (Cendre)...



P.26

# MAGNÉTIQUE MAGNÉSIUM

*Publié le 26 janvier 2012*




**Dolomie métamorphique.**
**Source : CRPG Nancy**

Le magnésium est un élément assez mystérieux. Adulé par les producteurs des « cultures spéciales », parfois jusqu'à l'excès en viticulture ou en agriculture biologique, il est le plus souvent ignoré en grandes cultures. Pourtant, le magnésium fait partie de la cour des « grands », classé comme élément majeur, avec des besoins magnésiens des plantes sensiblement équivalents à ceux du phosphore, de 20 à 50 kg/ha de MgO selon les espèces.

Indispensable à la vie végétale, il constitue, comme le phosphore et le soufre, environ 0,4% de la matière sèche des végétaux.
Le magnésium a, comme le calcium, la spécificité d'avoir des rôles fondamentaux pour le végétal, mais aussi des effets sur le fonctionnement même du sol. Nous développerons ici quelques remarques sur le magnésium au sol.

## FORMES DANS LE SOL

Dans le sol, l'essentiel du magnésium est absorbé sur le Complexe Argilo-Humique ou incorporé aux silicates des argiles. Sa forme ionique, dans la solution du sol, est positive et divalente (Mg++). Exprimée en MgO (oxyde de magnésium), la teneur totale en magnésium est de moins de 1% dans les sols non calcaires et est souvent supérieure à 2% dans les sols calcaires. Pour un sol de densité apparente 1,3 et d'une profondeur de 50cm, cela représente de 30 à 130 tonnes de MgO par hectare. Toutefois la fraction échangeable, plus ou moins disponible pour la plante, dosée au laboratoire après extraction à l'acétate d'ammonium, ne va plus représenter que 0,5 à 10 t /ha dont à peine 10 kg dissous dans la solution du sol.
Le magnésium est peu retenu par le Complexe Argilo Humique et s'avère donc relativement lessivable. Les pertes annuelles représenteraient de 20 à 50 kg/ha de MgO.
On estime qu'un tiers des sols français est excédentaire en MgO (du fait de la nature de la roche mère) et qu'un sol sur six environ est déficitaire (il s'agit le plus souvent de sols squelettiques).

## ATTENTION AUX ANTAGONISMES

Comme les autres cations (c'est-à-dire les éléments minéraux à charge positive), le magnésium en excès va s'opposer au prélèvement par les plantes de tous les autres éléments positifs :

calcium, potassium mais aussi tous les oligo-éléments (sauf le molybdène). Ainsi l'excès de magnésie dans un sol est un facteur d'aggravation des phénomènes chlorotiques.

A l'inverse, tout excès de K2O ou CaO (voire Na2O) va limiter l'assimilabilité du magnésium. Les équilibres des cations sur la CEC et les rapports K/Mg et Ca/Mg sont donc des éléments importants à prendre en compte dans l'interprétation d'une analyse de terre et la construction d'un plan de fertilisation. Pour la majorité des espèces, un rapport K/Mg correct est compris entre 0,8 et 1,2.

## PRINCIPAUX EFFETS SUR LE SOL

**Effet sur le pH :** la magnésie, c'est-à-dire l'oxyde de magnésium MgO, est particulièrement efficace pour redresser le pH d'un sol : 1,4 fois plus que CaO. Ainsi, la Valeur Neutralisante (1) d'une dolomie (à 30% de CaO et 21% de MgO) est de 59, alors qu'elle ne serait que de 51 pour un carbonate de calcium dosant 51% de CaO. Mais cette efficacité est souvent dangereuse. En effet, tout excès de MgO au sol va limiter la disponibilité du calcium, par antagonisme. On rencontre assez fréquemment des sols à pH correct grâce à leur richesse magnésienne, mais où il est nécessaire de continuer à apporter du calcium, sous forme très soluble (pour ne pas augmenter le pH), l'excès de MgO bloquant le calcium pour la nutrition de la plante. L'amendement avec des produits calco-magnésiens est donc à utiliser avec précaution, sur la base d'une analyse de sol.

[...]

[...]

**Effet sur la structure du sol :** dans le même ordre d'idée, l'excès de MgO participe à « défloculer » le sol, et donc à dégrader sa structure (moindre prise en mottes). En effet, le magnésium prend la place du calcium sur le complexe argilo-humique, mais sans en avoir tous les rôles agglomérants.

**Effet sur la salinité :** par ses caractéristiques ioniques et atomiques, le magnésium augmente la salinité des sols. Si ce problème est encore peu fréquent en France, tant que la pluviométrie reste suffisante (sauf pour certains sols maraîchers ou en pépinières), il est particulièrement grave en Afrique du Nord où l'excès de magnésium peut empêcher la culture de certaines espèces. La mesure de la conductivité sur l'analyse de sol est donc une donnée indispensable pour certains pays ou végétaux.

## CONDITIONS D'ASSIMILATION

L'assimilation du magnésium par les racines est beaucoup moins soumise à une bonne porosité du sol que celle du phosphore. De même, son passage dans le végétal est moins lié à la disponibilité hydrique que celui du potassium.

Les contraintes majeures de l'assimilation du magnésium, s'il est présent au sol, sont donc surtout les excès éventuels des autres cations, potassium et calcium.

Mais le magnésium a la caractéristique d'être un élément « climatique ». Sa migration interne dans le végétal est totalement sous la dépendance de la régularité thermique. Ainsi, dans les périodes de forts écarts thermiques, fréquents en fin de printemps, il n'est pas rare sur les espèces sensibles, la vigne par exemple, d'observer des symptômes de carences magnésiennes, sans que cela ne soit un problème de disponibilité au sol.

C'est une banalité de dire que le magnésium est indispensable à la vie végétale. Quel élément minéral majeur ne l'est pas ? Comme pour tous les autres éléments minéraux, la nutrition en magnésium d'une plante résulte de la combinaison entre le fonctionnement et les équilibres du sol, les conditions climatiques et la caractéristique du végétal concerné

Contrairement à l'azote et au potassium dont les besoins de la majorité des cultures sont significatifs pondéralement, justifiant souvent un apport annuel, les besoins en magnésium sont, dans la majorité des cas, assez limités. La « fertilisation » en magnésium, s'il y a lieu, correspond le plus souvent à une anticipation d'aléas climatiques ou de blocages au sol avec un objectif de sécurisation plutôt que de réponse aux besoins en tant que tels.

Question 1 : Mg est-il présent au sol ?
si NON :
si OUI :
Apport au sol (cas a)
Question 2 : Mg est-il disponible ?
si OUI :
si NON :
Pas d'apport
Apport par voie foliaire (cas b)

Source : Laboratoire LCA

## DES RELATIONS ASSEZ PARTICULIÈRES ENTRE LE MAGNÉSIUM, LA PLANTE ET LE CLIMAT…

**Rôles plastiques du magnésium dans la plante :** Le rôle le plus connu du magnésium est d'être un constituant direct de la chlorophylle, même si cela représente en général moins de 10% du magnésium contenu dans la plante. Un manque de magnésium, en tant que constituant plastique, va se caractériser par des décolorations (internervaires, en V…), des rougissements (vigne..) ou des nécroses brunâtres, commençant toujours par les feuilles vieilles, ce qui est le seul critère fiable de reconnaissance (confusion possible cependant avec le manganèse).

**Rôles métaboliques du magnésium dans la plante :** Les autres rôles du magnésium sont essentiellement métaboliques. De façon réductrice, on peut les classer en deux groupes distincts :

*- Intervention dans des réactions enzymatiques :* le magnésium est indispensable à l'activation (ou accélération) d'un certain nombre de réactions biochimiques en complément d'une enzyme. Beaucoup vont concerner les processus chlorophylliens (et donc glucidiques). Un manque de magnésium, dans ce rôle métabolique, va alors se caractériser par un jaunissement des feuilles, sans distinction évidente de leur âge, que l'on peut confondre avec un manque d'azote, de fer, de manganèse, de soufre, voire de zinc (ou par des niveaux conjointement limités, sans être déficitaires, de plusieurs de ces éléments). Dans les organes d'accumulation, on pourra observer un manque de sucres.

*- Relation avec les autres cations majeurs :* le magnésium participe directement aux équilibres cationiques dans le végétal, avec le calcium et le potassium, et des propriétés sensiblement intermédiaires, notamment en termes de solubilité.
Le rôle le plus connu, à ce niveau, du magnésium est le contrôle de l'approvisionnement en eau des cellules. Un manque de magnésium limite ainsi la résistance du végétal aux fortes températures ou au vent. En cultures estivales (arboriculture, viticulture, maraichage, maïs…), il est souvent utile de vérifier en fin de printemps le niveau de nutrition en magnésium.

Le magnésium, en excès instantané, va prendre la place du potassium ou du calcium, sans en avoir tous les rôles, l'inverse étant également vrai. Cette balance cationique est à la base du fonctionnement d'un végétal et donc de la fertilisation.

## MAGNÉSIUM ET PHOSPHORE

Il s'agit là d'une application du rôle co-enzymatique du magnésium. Que ce soit directement (en activant les ATpases) ou indirectement, le magnésium stimule la nutrition en phosphore du végétal, à la fois pour ses prélèvements etson transport interne. Dans les sols où le phosphore s'assimile mal (pH alcalin, manque de porosité, réchauffement difficile… ) le soutien en magnésium (dans ce cas de préférence par voie foliaire) est très souvent plus efficace sur la nutrition en phosphore que l'apport de phosphore lui-même !

[...]



P.28

[...]

## MAGNÉSIUM ET VALORISATION DE L'AZOTE

L'approche actuelle de la nutrition végétale est de raisonner l'élément minéral dans ses relations avec les autres (équilibres, antagonismes, synergies…) avec une vision globale et fonctionnelle (en extension de la fameuse loi de Liebig, dite du facteur limitant, souvent illustrée par une barrique dont l'une des douelles est plus basse que les autres).

Ainsi on a vu que la plupart des rôles plastiques et métaboliques du magnésium interviennent sur les processus photosynthétiques et chlorophylliens. Le magnésium est donc en relation directe avec l'azote (comme le sont également le soufre, le fer, le manganèse et le zinc). On peut alors présenter le magnésium comme indispensable pour valoriser l'unité d'azote apportée. Sur certaines espèces maraîchères fragiles, on estime qu'un manque de 20% de magnésium limite de 25% l'efficacité de l'azote. Face à une plante visuellement peu végétative (ou « ne répondant plus à l'azote ») ou face à la question d'un apport complémentaire d'azote sur céréales, il est parfois plus efficace (mais aussi moins onéreux et écologiquement plus responsable) de se poser d'abord la question d'un éventuel soutien magnésien.

## MAGNÉSIUM ET MISE EN RÉSERVE

Le magnésium est, avec l'azote, l'élément qui se met le plus en réserve chez les plantes pérennes ou pluriannuelles, proportionnellement aux besoins annuels (fraisiers par exemple). Ce mécanisme permet d' « assurer » la qualité de reprise végétative au printemps. Si on ajoute à cela l'importance du magnésium sur le métabolisme glucidique (mise en réserve carbonée), on comprend la nécessité de prendre en compte cet élément dans les objectifs de fertilisation visant la mise en réserve.

## RAISONNEMENT DE L'APPORT MAGNÉSIEN

La majorité des sols français est correctement pourvue en MgO : voir Magnétique magnésium (Partie 1/2). Par conséquent la problématique est beaucoup plus la disponibilité de ce magnésium, non assimilable du fait des excès de calcium et potassium. Par ailleurs, le magnésium a la caractéristique d'être un élément « climatique ». Sa migration interne dans le végétal est totalement sous la dépendance de la régularité thermique. Dans les périodes ou dans les régions à forts écarts thermiques, on peut observer des visualisations de carences magnésiennes, sans que cela ne soit un problème de disponibilité aux racines. Dans ce cas, l'apport au sol ne sert à rien.

De plus, l'excès de magnésium au sol devient vite un facteur de blocage du potassium, du calcium mais aussi des oligo-éléments (surtout du manganèse). Un apport au sol n'est jamais systématiquement nécessaire a priori.

Ainsi, techniquement, le raisonnement de la fumure en magnésium devrait suivre le raisonnement suivant :

## LE MAGNÉSIUM EST-IL PRÉSENT AU SOL ?

*(voir analyses de sol)*

**> si NON** : apport au sol (cas a), sans dépasser 60 kg/ha/an de MgO, sauf redressement éventuel du sol, qui est toujours une opération risquée

**> si OUI** : le magnésium est-il disponible ? (voir analyses de sol et risques de blocage, analyses de végétal, conditions climatiques et comportement de la plante) : > si OUI : pas d'apport

> si NON : apport par voie foliaire (cas b).

Par chance, le magnésium pénètre bien par voie foliaire et migre facilement dans le végétal, sous une forme simple comme les sulfates. Ce soutien foliaire est d'autant plus efficace qu'il est fait en anticipation des séquences climatiques difficiles. Du fait des risques d'antagonismes (K, Ca, Mn…), il n'est jamais à systématiser. Il est nécessaire également de faire attention aux risques de « sur-pénétration », et donc de phytotoxicité, avec certaines formes chélatées ou à support azoté.

# CHRONIQUE CALCIQUE

*Publié le 30 mars 2011*

Le calcium occupe une place très particulière dans « l'imaginaire » agronomique. Son rôle fondamental dans le modèle classique du fonctionnement du sol (pH, complexe argilo-humique, structure, vie microbienne…) fait souvent oublier que le calcium est également un élément indispensable à la vie des végétaux cultivés. Avoir un pH « correct » dans un sol ne signifie pas forcément que la disponibilité du calcium y soit suffisante pour la nutrition.

## LE CALCIUM PARTICIPE À TROIS FONCTIONS FONDAMENTALES

- **structurale :** il participe à la croissance et à la résistance physique des organes en intervenant dans la composition et la capacité d'élongation des parois cellulaires,
- **électro-chimique** : complexation de certains déchets cellulaires, régulation de la perméabilité des cellules, catalytique : lien avec les hormones auxiniques, composition d'enzymes …

Il est curieux de constater que beaucoup de tableaux de fertilisation oublient les besoins annuels en calcium alors qu'ils sont souvent équivalents, voire supérieurs, à ceux de l'azote. Dans la composition globale d'un végétal, le calcium est plus présent que le potassium. Il ne s'agit surtout pas de l'inclure systématiquement dans la fertilisation annuelle, mais il est nécessaire de se demander si le calcium est suffisamment disponible dans le sol.

L'analyse de sol va donner une première réponse (niveau en CaO échangeable, pourcentage de calcium fixé sur la CEC, équilibre du calcium vis à vis du potassium, magnésium et sodium, état organique…). L'interprétation va aussi tenir compte de la texture du sol en termes de porosité. En effet, tout manque d'oxygène (compactage, tassements, saturation en eau…) va limiter l'assimilabilité du calcium. Il peut arriver ainsi, dans certains cas, d'être obligé d'apporter du calcium sous forme très soluble en sol basique, voire chlorosant (avec, dans ce cas, certaines précautions) ; c'est une pratique assez courante en pomiculture par exemple.

Plus la croissance du végétal est forte ou plus le végétal est vigoureux, et plus les besoins en calcium sont élevés. On observe ainsi souvent, sur céréales, une crise calcique.
Ce stress est provoqué par des conditions climatiques très poussantes ou un excès de disponibilité en azote ; cela conduit à une « sur-assimilation » azotée, alors que les prélèvements du calcium sont plus difficiles et contrôlés.

## LE RAPPORT N / CA EST À LA BASE DE LA NUTRITION VÉGÉTALE

Par ailleurs, tout excès de potassium, magnésium ou sodium (par présence au sol ou apport) va pénaliser l'assimilation du calcium. Ainsi, en sol à faible disponibilité calcique, des excès de fertilisation en K2O ou MgO vont être facilement pénalisants, surtout si les épandages sont positionnés trop proches des périodes de forts prélèvements en calcium.

En dehors des désordres bien identifiés (bitter-pit sur pommes, coulures accentuées en vigne, cœur brun de la pomme de terre, pourriture apicale de la tomate…), le manque de calcium peut, plus insidieusement, être un facteur limitant de la croissance.

Des indicateurs tels que le pH et/ou le ratio Ca/CEC nous permettent de vérifier que nous avons des conditions agronomiques correctes, mais l'idéal pour le sol ne correspond pas toujours aux conditions idéales de fonctionnement du végétal. Si le sol n'est pas à même d'assurer la nutrition en calcium du végétal, ou s'il n'y a pas d'entretien calcique régulier, des amendements calciques sont à apporter au sol. Les produits à utiliser vont se caractériser par leur solubilité élevée : sulfates de calcium (plâtre ou gypse), carbonates de calcium à forte solubilité carbonique, lithothamne.

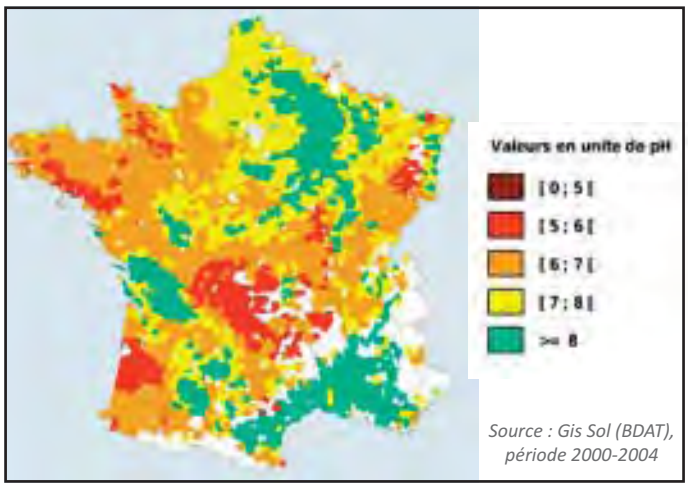
Faut-il effectuer un entretien calcique de mon sol ou réfléchir plutôt à la nutrition en calcium? Le manque de calcium dans mon végétal est-il lié au sol ou à d'autres facteurs ? L'équipe d'agronomes de LCA est à votre disposition pour vous aider à répondre à ces questions.



P.30

# CHRONIQUE BASIQUE

*Publié le 17 mars 2011*




*Source : Gis Sol (BDAT), période 2000-2004*

## L'ÉTAT D'ACIDITÉ DES SOLS : VARIABILITÉ HORIZONTALE ET VERTICALE

Les sols sont issus de phénomènes complexes, leurs caractéristiques physiques et chimiques dépendant de l'origine du sous-sol et des antécédents climatiques. L'acidité d'un sol est fortement influencée par la nature de la roche mère ; les granits bretons sont par exemple responsables de la formation de terrains acides, alors que le calcaire et la craie de la Champagne donnent des sols basiques (cf. carte de France des pH). Le climat et les pratiques culturales vont également avoir une action sur le statut acido-basique d'un sol, une parcelle cultivée ayant une tendance naturelle à l'acidification.

Le pH eau (1) d'un sol peut être le principal facteur limitant dans un système de culture : risque de toxicité aluminique et/ou manganique, vie biologique ralentie, problèmes de structure dans les terres limoneuses, blocage des oligo-éléments, … L'utilisation d'amendements minéraux basiques (chaulage) permet d'intervenir sur le pH eau pour le maintenir dans une fourchette comprise entre 5,6 et 6,5. Les préconisations d'apport de ces produits dépendent des systèmes de culture et du statut acido-basique du sol (besoin en bases).

## CALCUL DU BESOIN EN BASES

Le besoin en bases dépend de plusieurs facteurs, et nécessite une analyse de terre récente :

· le pH eau et le taux de saturation S/CEC (2) permettent de choisir la stratégie à adopter (redressement ou entretien) en fonction de l'optimum agronomique visé ;

· le calcul du redressement se fait en prenant en compte le pouvoir tampon du sol, estimé par la mesure de la Capacité d'Echange Cationique (CEC), afin de ramener le sol à la valeur de S/CEC à l'optimum agronomique ;

· la stratégie et les formules de calcul dépendent d'un certain nombre de scénarios (cas général, prairies, systèmes betteraviers et endiviers, …) mis au point par le groupe « Chaulage » du Comité Français d'Etude et de Développement de la Fertilisation Raisonnée (COMIFER) (3)

· Les apports de redressement peuvent être fractionnés, mais il faut veiller à apporter malgré tout une quantité significative d'amendement basique, surtout si le pH eau est inférieur à 5,5 : à dose trop faible, l'action de l'amendement ne sera pas suffisant, en particulier si le pouvoir tampon du sol est élevé.

## AMENDEMENT MINÉRAL BASIQUE

Les amendements minéraux basiques doivent répondre à la norme NF U44-001 pour pouvoir être mis sur le marché. Il existe 6 classes, en fonction de l'origine et de la composition de l'amendement. Tous les produits ne rentrant pas dans le cadre de cette norme doivent avoir une homologation spécifique demandée par le fabricant. On peut également citer des produits répondant à d'autres normalisations ou réglementations, comme les boues chaulées, les composts ou fumiers de champignonnière, ...

Il existe un certain nombre d'éléments de marquage obligatoire, selon la classe du produit. En voici quelques-uns :

· teneurs en CaO et MgO
· valeur neutralisante
· solubilité carbonique
· humidité
· finesse de mouture

## CHOIX DE L'AMENDEMENT

Le choix de l'amendement se fait en fonction des caractéristiques de la parcelle (CEC, pH eau, …) et de la rapidité d'effet recherchée : par exemple, si le pH eau est inférieur à 5,5, il est important de le remonter rapidement pour s'affranchir du risque de toxicité aluminique.

Plus le pH eau de la parcelle est élevé, plus il faut choisir un amendement réactif : en effet, le lessivage en CaO est important lorsque le pH du sol est proche de la neutralité. Il faut donc tenir compte de ce lessivage et pallier la perte de chaux lors de l'apport. De même, plus un produit est fin, plus il réagit rapidement avec le sol. Et son action est d'autant plus efficace qu'il est réparti de façon régulière dans le sol. Parmi les facteurs indépendants du produit lui-même, on comprend que la qualité de l'épandage a aussi des conséquences non négligeables sur son efficacité.

Les indicateurs de marquage obligatoire de la norme NF U44-001 sont là pour nous aider dans le choix des amendements basiques.

**. Teneurs en CaO et MgO :** la concentration en calcium et en magnésium est le premier critère de choix d'un amendement. Toutefois, ce n'est pas parce qu'un produit contient du calcium et /ou du magnésium qu'il a une action neutralisante. Le plâtre, le gypse, le sulfate de magnésie par exemple n'agissent pas ou très peu sur le niveau du pH du sol. Ces produits sont des sels d'acides forts et contiennent un radical acide qui va contrecarrer leur action alcalinisante.

**. D'où la notion de valeur neutralisante (VN) ;** celle-ci est mesurée selon la norme NF U44-173. La méthode consiste en la détermination de la quantité de produit nécessaire à la neutralisation d'un acide (acide chlorhydrique) exprimée en quantité équivalente d'oxyde de calcium CaO. Ce critère permet de classe r les différents produits en fonction de leur potentiel de neutralisation mais ne renseigne pas sur la rapidité d'action sur le sol. Dans le cas des produits cuits, la dénomination seule permet de préjuger de la rapidité d'action. Les chaux vives ont une action rapide. Pour les amendements crus, la rapidité d'action dépend de l'origine et de la finesse de broyage de la roche. Une craie ou un marbre peuvent avoir des valeurs neutralisantes voisines mais des rapidités d'action très différentes.

**. La solubilité carbonique :** en mesurant la vitesse d'attaque du produit par un acide faible (solution saturée en gaz carbonique selon la norme NF U44-174), on simule le comportement du produit une fois incorporé au sol. Plus le produit a une solubilité carbonique élevée, plus sa rapidité d'action est importante.

**. La finesse :** elle est une indication obligatoire dans le cas des calcaires. Plus le produit est fin, plus il permet un contact intime avec les particules de terre. La finesse conditionne donc la rapidité d'action.

[...]

[...]

D'autre part, certains fournisseurs peuvent utiliser un référentiel commun pour comparer les amendements minéraux basiques. A chaque produit est associé un indice, appelé IPA(4), dont l'échelle varie de 40 à 150. L'amendement adapté à chaque situation agronomique est déterminé en fonction de son IPA et de l'objectif de saturation de la CEC du sol.

L'analyse de terre est un outil de diagnostic incontournable du statut acido-basique des parcelles agricoles. Le LCA vous propose ces analyses de terre avec ou sans interprétation des résultats. Dans le cas des analyses interprétées, nous avons intégré les dernières avancées en matière de raisonnement du chaulage.

*(1) pH eau : pH d'une suspension de terre dans de l'eau permettant d'apprécier le pH d'une parcelle au moment du prélèvement*

*(2) S/CEC : taux de saturation de la Capacité d'Echange Cationique (CEC) par les cations (K+, Mg2+, Na2+ et Ca2+), le complément quand il est inférieur à 100 étant occupé par des protons H+*

*(3) Le Comifer Chaulage a édité en 2010 une seconde version de sa brochure « Le Chaulage, des bases pour le raisonner » clic*

*(4) IPA : Indice de Positionnement Agronomique, mis au point par l'UNIFA (Union des Industries de l Fertilisation), est un outil d'harmonisation dépendant des caractéristiques suivantes du produit :*
*- nature : carbonate dans les calcaires et dolomies, oxyde ou hydroxyde dans les chaux, silicate dans les amendements basiques sidérurgiques ;*
*- composition en pourcentage pour les amendements mixtes ;*
*- présentation : séché, humide, liquide ;*
*- pour les carbonates :*
*> Finesse ;*
*> Réactivité mesurée par la solubilité carbonique pour les carbonates fins, pulvérisés ou broyés, ou la dureté pour les carbonates grossiers concassés.*



P.32

# DUO DE PH AU MENU

*Publication du 6 décembre 2012*

Les clients de LCA ont remarqué que depuis quelques semaines, le dosage du pH KCl apparaissait systématiquement sur les bulletins d'analyse de sol. Jusqu'à présent réalisé pour les sols acides ou voisins de la neutralité (pH eau < 7,0), il est maintenant réalisé systématiquement également pour les sols alcalins. Cet AgroReporter se penche sur les raisons de cette évolution et rappelle les utilisations pratiques du pH KCl.

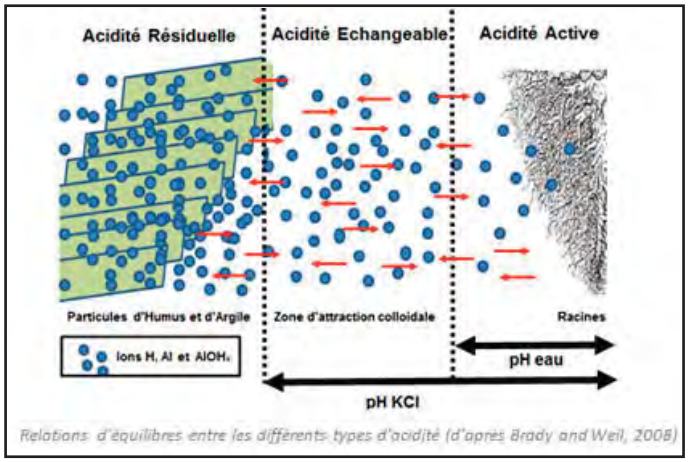
## LES DIFFÉRENTES ACIDITÉS DU SOL

Pour mesurer l'acidité, les laboratoires disposent d'un indicateur : le potentiel hydrogène, ou pH.
On distingue trois types d'acidité dans les sols : active, échangeable et résiduelle. A chaque type d'acidité à mesurer, va correspondre un réactif d'extraction différent.

- **L'acidité active** est mesurée par le pH eau, ainsi appelé car la mesure se fait après avoir placé l'échantillon de terre dans de l'eau désionisée, selon une méthode normalisée (NF ISO 10390). Cette mesure, pratiquée par tous les laboratoires, représente pour l'agronome le pH de la solution du sol (lié aux ions H+ dissous). On parle également d'acidité actuelle. Le pH eau est considéré comme celui que subissent les racines et les micro-organismes.
D'une façon générale, en France, lorsque l'on parle de pH du sol, il s'agit du pH eau. Ce n'est pas le cas dans tous les pays, ce qui engendre souvent des problèmes dans les traductions ou les échanges entre spécialistes !

- **L'acidité échangeable** (ou d'échange) s'estime par le pH KCl. L'eau utilisée pour la mesure du pH eau est complétée par du chlorure de potassium. Le potassium va prendre la place des ions aluminium et hydrogène présents sur le complexe argilo-humique et facilement extractibles. Ces ions expulsés H+ vont être dosés, en plus de ceux déjà présents dans la solution du sol. Le pH KCl est donc toujours plus acide que le pH eau. On parle d'acidité potentielle, c'est-à-dire, plus ou moins, le pH que peut atteindre un sol que l'on laisse évoluer sans chaulage.
Dans certains pays, germaniques notamment, seul le pH KCl est réalisé. Les agronomes y estiment que le pH eau est trop variable selon les années et les conditions de prélèvements, alors que le pH KCl est plus stable et reflète mieux les échanges de la vie du sol.

- **L'acidité résiduelle** n'est pas mesurée ordinairement au laboratoire. Elle prend en compte les ions hydrogène et aluminium , ainsi que les



*Relations d'équilibres entre les différents types d'acidité (d'après Brady and Weil, 2008)*

hydroxydes d'aluminium très fortement retenus par les argiles et matières organiques.

Mais il peut exister d'autres mesures du pH d'un sol. A titre d'exemple, le pH CaCl2 notamment est très utilisé par les agronomes soviétiques.

Il n'y a pas de lien ou d'extrapolation possible entre les différentes mesures de pH. Chacune représente une approche différente et contribue à bâtir un diagnostic du degré d'acidification d'un sol.

## DUO DE pH

Selon les agronomes, **l'écart entre le pH eau et le pH KCl caractérise le potentiel d'acidification du sol.** Il renseigne sur les risques d'acidification d'une parcelle, dont on connaît par ailleurs le pH eau.

- **Ecart < 0,1** : pas de potentiel d'acidification. Très rarement rencontré en climat tempéré, ce cas est malheureusement relativement fréquent pour les sols tropicaux acides et exprime le fait que le stade ultime d'acidification est atteint. On parle alors parfois de « sol mort ».

- **Ecart compris entre 0,2 et 0,5** : faible potentiel d'acidification. Il faut vérifier si cela correspond à la nature même du sol ou à une dégradation de son état.

- **Ecart compris entre 0,6 et 1** : acidité échangeable moyenne. La prise en compte du pH KCl est nécessaire dans la gestion du chaulage.

- **Ecart > 1** : fort potentiel d'acidification. Là aussi, il sera intéressant de comprendre l'origine de cet écart (fort pouvoir tampon du sol, chaulage récent…) pour le choix et la fréquence des produits calciques ou calco-magnésiens à apporter éventuellement.

Cette différence entre le pH eau et le pH KCl est liée au pouvoir tampon du sol (complexe argilo-humique), aux pratiques culturales mais aussi aux conditions climatiques influant sur les transferts entre les différentes composantes du sol.
Nous ne développerons pas ici les notions de variabilité des pH en fonction de la profondeur, ni d'acidité de surface, pourtant essentielles. Cependant pour un critère à variabilité intra parcellaire importante comme l'acidité d'un sol, tout raisonnement doit obligatoirement se faire en fonction aussi de la profondeur de prélèvement.

[…]

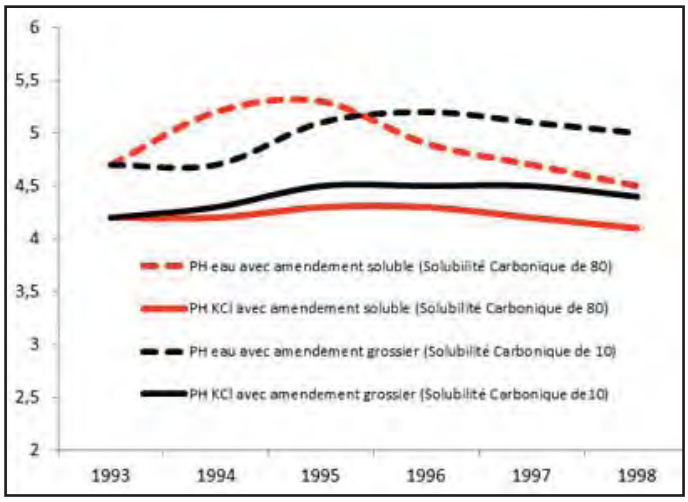
[...]

## pH KCl EN SOLO

On peut citer trois utilisations fréquentes du pH KCl : pour le suivi pluriannuel de l'acidité d'une parcelle, pour gérer une acidification volontaire du sol ou pour la gestion des amendements basiques.

**Suivi pluriannuel :**

Les variations saisonnières de pH eau sont assez élevées : classiquement de +/- 0,5 unités, elles peuvent atteindre une unité de pH dans certaines conditions spécifiques. Elles sont provoquées par les fluctuations des concentrations en acide carbonique et en sels solubles de la solution du sol. Même en prenant toutes les précautions nécessaires lors du prélèvement (toujours à la même période, sur des zones repérées de la parcelle, …), il n'y a que sur le long terme ou en multipliant les analyses que l'on peut réellement apprécier une acidification ou alcalinisation du sol.
Le pH KCl est une donnée qui, quoique soumise aux variations annuelles, semble plus robuste : classiquement, sa variabilité saisonnière est de +/- 0,3 et elle dépasse très rarement 0,5 (sauf en cas d'opérations particulières identifiables).
Ainsi, un suivi pluriannuel de l'acidité d'un sol sera toujours plus fiable s'il est effectué à partir du pH KCl. De l'objectif du chaulage (correction, entretien, nutrition, ...) dépend le type de produit à utiliser et le pH KCl est une aide supplémentaire à la décision.




**Gestion de l'acidification :**

« Comment acidifier un sol basique ? » Cette question, souvent posée aux agronomes, peut trouver une réponse dans les sols nettement alcalins (pH eau > 7,8) en adaptant le matériel végétal et les techniques. Les acidifications restent malgré tout temporaires et locales. Dans les sols légèrement alcalins (pH eau entre 7,2 et 7,8), il sera par contre intéressant d'apprécier le potentiel d'acidification :

- s'il est faible, le sol est bien à dominante basique et, dans ce cas, il faut le conduire comme tel;
- s'il est élevé (pH KCl très inférieur au pH eau), les modes de conduite acidifiants (utilisation d'engrais acides, choix raisonné des matières organiques, travail du sol approprié, …) permettront de ramener plus ou moins progressivement le pH eau du sol à un niveau plus confortable pour les racines.

**Gestion du chaulage :**

Le pH eau du sol est la base habituelle des appréciations, abaques et calculs des besoins en amendement basique, associé à la CEC (Capacité d'Échange en Cations), aux taux de saturation et souvent à la part occupée par le calcium sur la CEC. Ce sujet a été développé dans un précédent Agro Reporter, « Chronique basique » .
Il est important de comprendre que l'agronomie est basée sur des modèles qui, même s'ils deviennent de plus en plus élaborés, ne peuvent refléter que partiellement la réalité de fonctionnement d'un sol, tant elle est complexe. Ainsi la notion de « vie du sol » (voir par exemple l'Agro Reporter sur la Rhizosphère) n'intervient pas dans les modèles de chaulage qui restent basés sur une approche très chimique du sol.
Ces modèles, bien que par nature « simplificateurs », sont néanmoins des outils dignes de confiance. Mais étant donné le coût d'une opération de chaulage et les risques agronomiques éventuels, le praticien doit prendre du recul, avoir une approche sécuritaire en confrontant plusieurs sources d'informations indépendantes (plusieurs données analytiques non liées entre elles). Le pH KCl intervient à ce niveau, surtout pour les sols au pH eau voisin de leur pH « idéal ».

*Ainsi, la prise en compte du pH KCl permet d'avoir une vision plus dynamique de l'acidité du sol. Il est de plus en plus utilisé par les agronomes sur le terrain en le confrontant aux autres données analytiques. L'analyse de sol n'est utile que si elle est génératrice de conseil et c'est en ce sens que le laboratoire LCA a décidé de systématiser le dosage du pH KCl sur tous les types de sols.*

*L'équipe d'agronomes de LCA est à votre disposition pour répondre à vos questions et échanger sur ces problématiques.*



P.34

# VERS DE NOUVELLES BASES ?

*Publié le 30 janvier 2014*

Dans les métiers pragmatiques comme ceux de l'agriculture et de l'agroenvironnement, le partage des résultats de la recherche, des observations terrain et des innovations technologiques avec les exploitants agricoles est à la base de la vulgarisation et du conseil technique. Il est donc important qu'il existe des lieux où les différents intervenants d'une filière puissent échanger. Dans cette optique, l'AgroReporter s'intéresse cette semaine aux travaux d'un groupe chargé du thème du chaulage au Comité Français d'Étude et de Développement de la Fertilisation Raisonnée (COMIFER).

## Le groupe chaulage du COMIFER

Le groupe chaulage du COMIFER rassemble une vingtaine de membres actifs et autant de membres associés, intéressés par la problématique du chaulage. Ils viennent d'horizons très divers, INRA, instituts techniques, enseignement, chambres d'agriculture, laboratoires d'analyses de terre, de sociétés de fabrication et de commercialisation d'amendements.

## Activité

Après avoir réactualisé en 2012 la brochure « Le Chaulage, des bases pour le raisonner » (télécharger), le groupe chaulage continue ses travaux pour proposer une méthode de raisonnement simple et fiable à mettre en place sur le terrain.

Il travaille en parallèle sur l'évolution des méthodes d'analyses liées à son champ d'action. Ainsi, la mise au point par des membres du groupe de la norme TS 16375 (dosage des carbonates résiduels dans un sol) permet d'obtenir un résultat beaucoup plus précis que le simple dosage du calcaire total. Cette méthode a permis de réaliser des suivis de dissolution des amendements minéraux basiques (AMB), après une incorporation jugée parfaite (essais LDAR/MEAC), et en conditions agricoles par travail superficiel (essais Arvalis). Une présentation des premiers résultats a été réalisée lors des 11èmes rencontres de la fertilisation raisonnée et de l'analyse de terre COMIFER/GEMAS (cliquer sur l'image).

Ces travaux permettent de mieux comprendre la dissolution au champ des AMB, et donc leurs effets.

## Actualité

Le groupe travaille également à la mise au point d'un bilan de protons en remplacement du bilan calcique actuel, qui permettra d'avoir une approche plus précise de l'évolution du statut acido-basique des sols, et donc des quantités d'AMB à apporter. Un poster a d'ailleurs été présenté lors des 11èmes rencontres de la fertilisation raisonnée et de l'analyse de terre COMIFER/GEMAS pour qualifier l'influence de certaines pratiques, comme la fertilisation azotée ou la gestion de l'interculture, sur les postes du bilan de protons.

Le groupe continue sa réflexion sur les indicateurs analytiques du statut acido-basique, suscitée par la mise à jour de sa brochure. Une présentation a été réalisée lors des 11èmes rencontres de la fertilisation raisonnée et de l'analyse de terre COMIFER/GEMAS : Il en ressort que :

- en sols acides (pHeau < 5,8) les indicateurs pHeau et taux de saturation S/CEC vont dans le même sens,
- les indicateurs pHeau et S/CEC sont bien corrélés mais peuvent présenter des discordances : il faut intégrer dans le diagnostic la date de prélèvement et l'historique des apports d'AMB,
- sur les sols à faible capacité d'échange cationique (CEC) (sable, sable limoneux) le S/CEC présente une précision médiocre et il est conseillé de préférer l'indicateur pHeau,
- en sol très acide (pHeau < 5,5) la mesure de l'aluminium échangeable permet d'ajuster le calcul de la dose d'AMB à apporter,
- s'il y a discordance entre les indicateurs pHeau et S/CEC, il est recommandé d'adopter un conseil intermédiaire, compromis entre le coût économique et le risque d'inefficacité

## A venir ?

À noter également, pour en finir avec l'idée que c'est le calcium qui agit dans les AMB, que la valeur neutralisante ne sera plus exprimée en CaO mais en unités OH-.

De même, à terme, le calcium mais aussi plus largement le phosphore, potassium, magnésium et soufre ne seraient plus exprimés dans les engrais et amendements sous leur forme oxyde (CaO par exemple), mais sous leur forme élémentaire : Ca, P, K, Mg et S. Bien évidemment un double étiquetage serait réalisé pendant un certain temps !

***On voit donc que les connaissances agronomiques évoluent et permettent de progresser dans les modes de raisonnement de la fertilisation et du chaulage. Les nombreuses expérimentations conduites tous les ans permettent d'affiner nos connaissances sur le fonctionnement des sols, et donc les conséquences des pratiques de fertilisation, chaulage, … Les modes de raisonnement sont régulièrement ajustés à la lumière de ces résultats. Les agronomes de différents laboratoires participent aux réunions du COMIFER dans la mesure où l'analyse de sol est l'instrument de gestion du chaulage et donc un outil de transfert de connaissances vers les producteurs. Les agronomes du LCA sont à votre disposition pour plus d'informations.***

# LE POIDS DES M.O.

*Publication du 18 janvier 2013*

*Représentation d'un agrégat de sol (Source : nature.com)*

La teneur totale en matière organique (MO) d'un sol est un premier indicateur de sa fertilité, mais il est loin d'être suffisant pour en apprécier le fonctionnement. La valeur totale mesurée va indiquer la dimension du « stock » de carbone organique, qui résulte du bilan des « entrées » de MO et de ses « sorties » par minéralisation. A l'image d'une balance, la masse de MO contenue dans un sol résulte de différents facteurs, parmi lesquels : la gestion des résidus de culture, le mode de travail et la couverture du sol, la présence de légumineuses, la pratique ou non d'apports organiques exogènes et leur nature, la nature du sol, le climat, le niveau d'activité microbienne…

Une analyse plus fine, compartimentale, des MO du sol permet une meilleure visualisation de leur qualité. A cette notion de « type de MO » sont associées celles de stabilité et de fonctions particulières dans le sol. Cette semaine, l'AgroReporter se penche sur le fractionnement granulométrique de la matière organique de la terre, une approche du sol qui intéresse chaque jour davantage les agronomes.

## LIMITES DU FRACTIONNEMENT CHIMIQUE

Les premières approches fines de la matière organique des sols (MOS) ont consisté, il y a plus de deux siècles, à des fractionnements chimiques à base de solutions alcalines et acides. Ils ont conduit à la détermination de différentes molécules plus ou moins complexes appelées composés humiques ou humus au sens large. On s'est lentement rendu compte que le fractionnement chimique avait deux grands défauts :

- d'une part il est fortement dénaturant, d'où une multitude de complexes moléculaires et un questionnement persistant à l'égard de la représentativité des molécules extraites par rapport à la fraction d'origine in situ;
- d'autre part, il ne répondait pas aux interrogations sur le turn over rapide de la MO (quelques mois à une dizaine d'années). Or, ce sont ces processus, tels que la minéralisation, les variations saisonnières de la structure, etc.… pour lesquels le rôle de la MO est considéré comme essentiel, en particulier dans les agro-systèmes.

D'autres approches ont donc été explorées.

## PRINCIPE DU FRACTIONNEMENT GRANULOMÉTRIQUE DES MOS

L'ère des fractionnements physiques (ou granulométriques) n'a démarré véritablement qu'aux débuts des années 1960 (1). L'objectif de la méthode est de séparer les matières organiques en fractions de tailles différentes et ayant de ce fait des comportements et donc des fonctions différentes. Plusieurs niveaux de coupures granulométriques peuvent être faits en fonction de la sensibilité recherchée.

L'âge moyen du carbone a été mesuré dans les différentes fractions, pour des sols cultivés tempérés (2) :

> fraction supérieure à 2 mm : moins de 1 an ;
> 0,2 mm à 2 mm : 2 ans à 5 ans ;
> 0,05 mm à 0,2 mm : 10 ans à 20 ans ;
> 0 mm à 0,05 mm : plus de 50 ans ;
> hydrosoluble : 5 ans à 10 ans.

*Fractions de MO libre grossière et fine (Photo : Celesta-Lab)*

Pour déterminer ces fractions au laboratoire, les terres subissent une dispersion poussée avant d'être tamisées à l'eau. L'analyse les sépare en deux parties, en précisant le rapport C/N de chacune. D'un point de vue agronomique, un consensus semble se dégager sur l'intérêt d'étudier deux types de fractions : les fractions de tailles supérieures à 50 µm, dites fractions « libres » ou « MO libre », et les fractions dites « liées » ou « MO liée » aux limons et argiles, de tailles inférieures à 50 µm. Une méthode normalisée existe depuis 2007 (3) (NF X31-516).

## UNE FRACTION = UNE FONCTION

Les matières organiques les plus grossières (MO libre, visible à la loupe), constituent le support de l'activité biologique du sol. Elles «nourrissent» la biomasse animale et microbienne du sol qui elles-mêmes participent à la nutrition des plantes notamment pour l'azote, le phosphore, le soufre, voire le calcium pour les sols les plus acides... Les matières les plus fines (MO liée, invisibles à la loupe), constituent les MO stables du sol et sont impliquées surtout dans les propriétés physiques des sols (stabilisation) et d'échange (capacité d'échange cationique). La connaissance des deux fractions et de leur rapport C/N permet donc de mieux caractériser la fertilité biologique du sol. Ainsi, pour un même type de sol et de culture, plus il y a de matière organique libre, plus l'activité biologique du sol est importante, plus le potentiel de fourniture en azote est élevé. La capacité d'échange cationique (CEC) du sol sera à l'opposée d'autant plus élevée qu'il y a de matière organique liée. Enfin si la matière organique libre permet une stabilisation éphémère des macroagrégats (>250 µm) par sa composante racinaire ou fongique, la matière organique liée permet de lier les microagrégats (<250 µm) de façon transitoire ou durable.

[...]

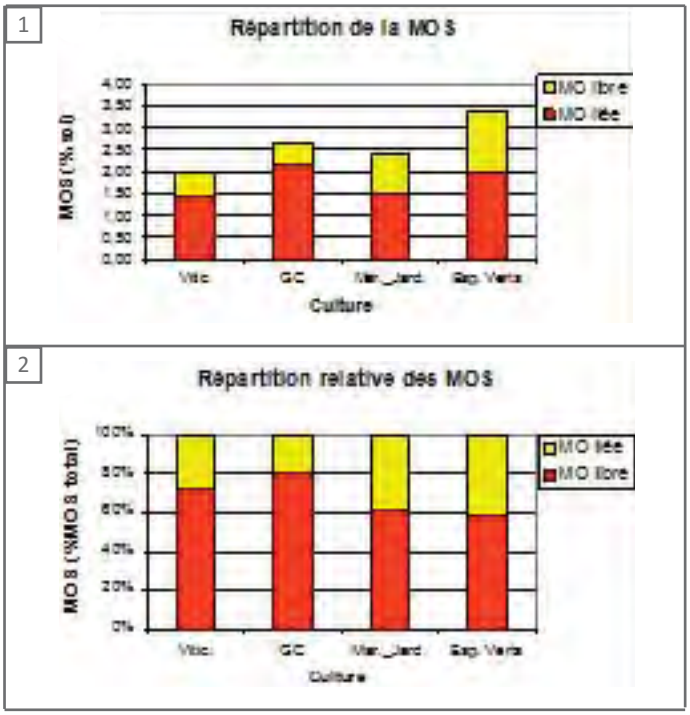
[...]

## APPLICATION : AFFINER LE RAISONNEMENT ACTUEL DE LA MOS

Les analyses physico-chimiques classiques précisent généralement la **teneur « souhaitable »** en MOS, estimée en fonction de la texture du sol, la teneur en calcaire, le pH du sol et le système de culture (céréale, vigne, etc…). A partir de cette valeur peut être calculée une quantité de MO à apporter pour « **redresser** » ou « **entretenir** » la teneur en MOS. En précisant si le déficit concerne le stock de **MO facilement minéralisable** (MO libre), ou le stock de MO stabilisée (MO liée), le **fractionnement granulométrique de la MO** permet d'affiner le diagnostic de gestion de la MOS. Il permet de savoir si, en terme d'apport organique, on doit privilégier la part stable de l'amendement, ou la part instable (= minéralisable), faisant le lien direct avec le type d'amendement organique à apporter. Ainsi, on préfèrera des produits très stabilisés et riches en MO stable, comme des composts de matière végétale, des fumiers compostés etc., si le déficit touche principalement la teneur en MO liée. Inversement, un déficit en MO libre, MO réservoir d'énergie, peut orienter vers des apports plus modérés mais plus fréquents en amendement organique ayant une stabilité faible à moyenne, mais riches en hémicellulose et cellulose, comme des fumiers frais, des matières végétales non compostées, des résidus de culture etc. A noter que ces caractéristiques des amendements sont très bien décrites par des analyses comme le fractionnement biochimique des amendements organiques (relire à ce sujet l'article ISMO GOOD ) et les potentiels de minéralisations du carbone et de l'azote .

D'autres **informations dynamiques** sont apportées par le fractionnement granulométrique de la MOS. Ainsi, pour un même type de sol, les proportions de chacune des fractions permettent de mettre en évidence une dynamique d'appauvrissement ou d'enrichissement en MOS plus finement que l'évolution de la MOS totale.

Les rapports C/N de chacune des fractions permettent également d'avoir une vision plus fine de l'évolution de la MOS du sol que le rapport C/N global. Ils permettent de distinguer la part d'héritage pédologique de la MOS de la partie liée aux pratiques agronomiques plus récentes.




*Répartition granulométrique de la matière organique dans les sols français en fonction de la culture (Source Celesta-lab) :(1) quantité des différentes fractions,(2) proportion relative de chacune des fractions*

Le fractionnement de la MO permet aussi de mettre en lumière les effets des pratiques d'entretien du sol comme le labour, le désherbage, l'enherbement permanent ou maîtrisé sur le stock de MOS et leur répartition. Par exemple, sous certaines conditions, les techniques de travail simplifié ont pu augmenter à la fois la teneur en MOS du sol dans les 10 premiers centimètres et celles de MO libre, tandis que le travail du sol tendait à augmenter la consommation de la matière organique et proportionnellement la part de MO liée du sol.

Cette analyse permet donc d'améliorer le conseil sur la gestion des apports organiques, tant en quantité qu'en qualité, la disponibilité de l'azote, les pratiques culturales (travail du sol, enherbement etc…). D'une manière générale, elle permet de mieux apprécier le potentiel organique du sol en lien avec la fertilité biologique.

# L'HISTOIRE DU SOL EN QUELQUES MO *(PARTIE 1/2)*

*Publication du 22 mars 2013*

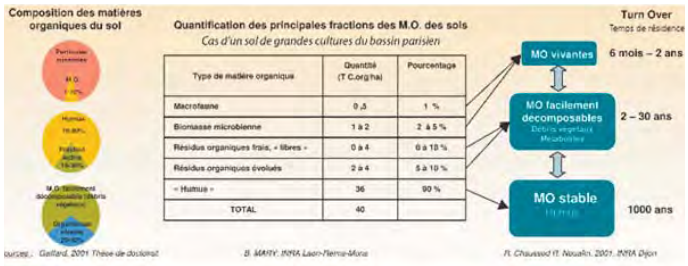
Aborder la problématique de la matière organique du sol est un exercice difficile. Thème très étudié, très documenté, mais aussi très polémique, il était néanmoins incontournable pour l'AgroReporter ! Même s'il les rappelle, cet article ne développera pas les rôles de la matière organique dans les sols. Ceux-ci ont été largement et très bien expliqués par d'illustres agronomes et pédologues.
En revanche, il va tenter de montrer comment, à partir d'une simple analyse de terre et de sa teneur en matière organique, il est possible d'identifier et de remédier à certains dysfonctionnements du sol.

## RAPPELS SUR LA NATURE ET LES FONCTIONS DES MO DU SOL

Pour restituer le contexte, rappelons que le sol, défini(1) comme la « formation naturelle de surface, à structure meuble et d'épaisseur variable, résultat de la transformation de la roche-mère sous-jacente sous l'influence de divers processus, physiques, chimiques et biologiques, au contact de l'atmosphère et des êtres vivants » par le pédologue Albert Demolon, ne prend naissance que lorsque, à ses constituants minéraux s'ajoutent des constituants organiques. Ceux-ci, encore appelés MATIERES ORGANIQUES (MO), peuvent provenir des organismes végétaux et animaux du sol, ou apportés au sol. Ainsi, les matières organiques du sol sont communément réparties en quatre groupes :

- Les végétaux et animaux vivants : bactéries, champignons, racines des végétaux supérieurs, vers, protozoaires, acariens, etc.
- Les déjections animales et les végétaux et animaux morts mais pas encore décomposés, formant les « matières organiques fraîches »
- Les matières organiques en cours de décomposition, parfois appelées « produits transitoires »
- Les matières organiques colloïdales, plus ou moins stabilisées par le processus d'humification.

L'ensemble représente en moyenne 2% de la masse d'un sol agricole, et 3% de son volume. Les différents types de MO ne sont pas quantitativement équivalents dans un sol (les MO les plus « évoluées » étant généralement majoritaires). D'autre part, ils se caractérisent par des temps de séjour différents, indissociables de la fonction jouée par les MO.




*Source : Chambre d'Agriculture du Languedoc-Roussillon. Les produits organiques utilisables en agriculture du Languedoc-Roussillon - Tome 1*

Pour comprendre pourquoi cette MO, qui ne représente que quelques pour-cents d'un sol, passionne tant la communauté scientifique, il faut s'intéresser à son importance fonctionnelle. On a coutume de dire qu'elle améliore à la fois les propriétés physiques, chimiques et biologiques.

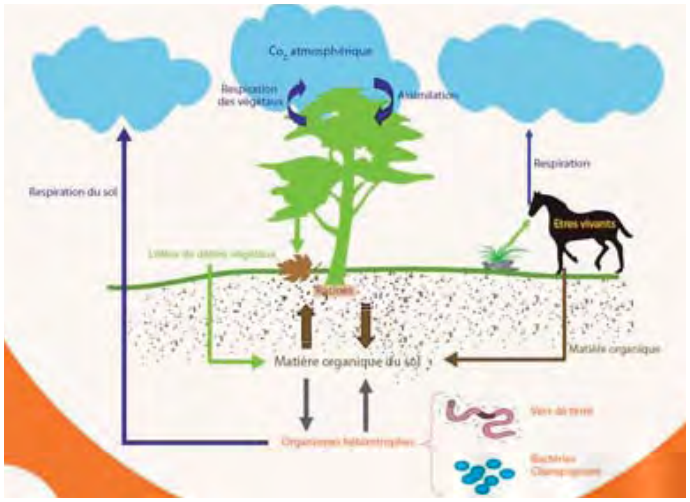
- Une des fonctions principales de la MO du sol est de stabiliser les agrégats, ces derniers participant à la formation d'une porosité essentielle au transport de l'eau et de l'air dans les sols. C'est surtout la fraction la plus active de la MO (biomasse microbienne, polysaccharides …) qui conditionne la stabilité des agrégats et indirectement, la structure du sol (effet anti-érosion et anti-compaction). Pour plus d'informations, (re)lire l'article d'AgroReporter « Le poids des MO ».

- La fraction organique du sol fournit aussi une grande diversité d'habitats et une source d'énergie pour la faune (lombrics, acariens, nématodes...) et la microflore (champignons, algues, micro-organismes...) du sol. La plupart de ces organismes décomposent la MO, maintiennent les propriétés physiques du sol et facilitent, dans certains cas, l'accès des plantes aux nutriments (mycorhizes, rhizobium par exemple). Pour plus d'informations, (re)lire l'article d'AgroReporter « Que faire de la rhizosphère ?». Ils peuvent également intervenir dans la dégradation de certains micro-polluants organiques (pesticides, hydrocarbures...), avant que ceux-ci n'atteignent les eaux de surface ou les eaux souterraines. Les composés organiques interviennent également dans l'inhibition de certains organismes phytopathogènes (effet suppresseur).

- En outre, la MO du sol représente un réservoir important dans le cycle du carbone. Des études récentes (notamment celle de L Ragot et K Schubert en 2007) ont démontré l'importance de la séquestration du CO2 atmosphérique dans ce réservoir.

## FACTEURS DE VARIATION DES TENEURS EN MO

La concentration en MO dans les sols dépend à la fois de la restitution de la biomasse au sol (prairie, culture, forêt), de l'apport de matières exogènes (fumier, boues de stations d'épuration, compost, ...) et du taux de minéralisation et d'humification de la MO, ces deux paramètres étant fonction, entre autres, de la qualité du substrat organique, de l'environnement physico-chimique du sol (pH, texture, …) et du climat (température, humidité, ...).




*Source : CNRS Sagascience : les bâtisseur du sol*

Il existe également une forte interaction entre les pratiques de travail du sol et la dynamique des MO du sol. Le travail du sol (ou le non travail) détermine les modalités d'incorporation et de décomposition des MO fraîches retournant au sol. Ainsi la pratique de travail du sol va influencer la localisation des MO dans le sol (dans les 10 premiers centimètres en non labour, alors que le labour la répartit sur tout l'horizon travaillé) mais aussi, leur vitesse de minéralisation. D'une façon générale, le passage aux techniques simplifiées de travail du sol s'accompagnerait d'une diminution de la vitesse de minéralisation de la MO du sol, qui peut être expliquée par une protection de la MO du sol dans les macro-agrégats, plus stables dans les situations non travaillées(2) . Les difficultés méthodologiques (modalités d'échantillonnage, effet des précédents ou des cultures intermédiaires, définition de la masse ou du volume de sol considéré…) nous obligent néanmoins à la plus grande prudence quand on interprète l'effet de modalités de travail du sol (cf Constantin et al).

[…]

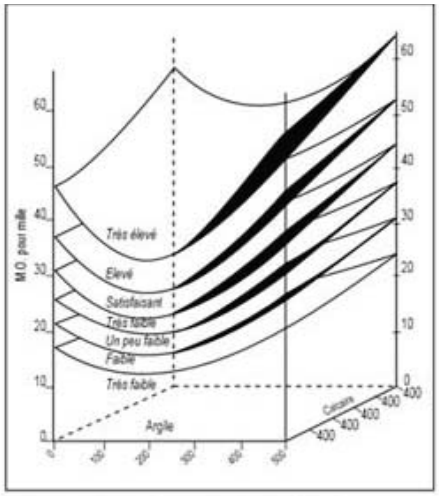
[...]

## TENEUR « SOUHAITABLE » DU SOL EN MO

On peut chercher à définir une teneur en matière organique "souhaitable", c'est-à-dire permettant d'obtenir des propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol acceptables. Rémy et Marin-Laflèche (1974) ont proposé un abaque permettant de qualifier l'état organique d'un sol cultivé suivant sa teneur en matière organique et ses teneurs en argile et en calcaire.

Très global, il n'a pas été rattaché par ses auteurs à des effets précisément mesurés des matières organiques sur le comportement et les propriétés du sol.

De ce fait, son utilisation est parfois remise en question. Plus récemment, Loveland et Webb(3) ont étudié les relations entre le taux de matière organique des sols et les rendements des cultures ou les comportements de différents sols de régions tempérées. Cette étude montre qu'il est très difficile de définir des teneurs satisfaisantes, même si l'on s'intéresse à une catégorie de sols donnée et à un type de propriété précis de ces sols. Dans les systèmes agricoles, les relations du sol avec le végétal cultivé et les objectifs du producteur complexifient l'approche. En effet la richesse en MO d'un sol doit aussi être raisonnée en fonction de l'espèce (voire de la variété en plantes pérennes), et de l'itinéraire technique (en particulier en Techniques Culturales Simplifiées ou en conduite biologique). De même, on ne peut réfléchir à la teneur en MO « normale » ou souhaitable d'un sol sans tenir compte des conditions climatiques qu'il subit (altitude, régime pluviométrique, variations thermiques…). On comprend, par exemple, qu'en termes de niveau et de fonctionnement, l'approche sera différente pour une prairie d'altitude en Aveyron, dans la plaine de la Crau, ou dans le moyen Atlas.




*Appréciation de l'état organique du sol en fonction de sa teneur en argile et en calcaire d'après l'abaque de Rémy et Marin Laflèche. Source : Rémy et Marin Laflèche, 1974.*

Dans la pratique, les laboratoires qui présentent des valeurs « souhaitables » ou « optimales » en MO dans l'interprétation des analyses de terre, s'appuient sur des valeurs standards. A la lumière des éclairages précédents, on comprend que ces valeurs sont à considérer comme informatives et peuvent être modulées en fonction des choix techniques ou de contraintes environnementales spécifiques. De son côté, le laboratoire LCA tient compte, pour fixer les teneurs dites « souhaitables » en MO des sols, du type de production (plante pérenne, grande culture, truffe, …), du type de sol (déterminé par l'analyse) et de la région. Le niveau de MO souhaitable correspond alors, selon les situations à :

- La valeur considérée comme normale ou satisfaisante pour des couples « type de sol x type de production » précis. Ces valeurs ont été fixées selon les cas, soit par une approche statistique descriptive de grands types de sol fréquemment rencontrés (dans ce cas, pour un type de sol donné, la teneur souhaitable correspond à la valeur moyenne observée), soit par adoption des référentiels régionaux, départementaux ou au niveau des terroirs (viticulture).
- La valeur calculée selon l'abaque de Rémy et Marin-Laflèche.

Ces niveaux permettent une première interprétation des teneurs en MO, issues directement de l'analyse. On a bien compris qu'il ne s'agit pas de donner une « norme impérative » des teneurs en MO d'un sol, mais de proposer un seuil permettant de réfléchir et de raisonner.

## TENEUR OU STOCK ?

Le stock de MO correspond à la quantité totale de MO présente dans un volume de sol. Il peut être exprimé en tonnes par hectare par exemple. La teneur en MO représente, quant à elle, le contenu en MO d'une quantité de terre fine (terre séchée à 38°C et tamisée à 2mm). Elle s'exprime couramment en % ou en g de MO/kg de sol sec. Pour passer de la mesure de la teneur à l'appréciation du stock de MO, il faut donc connaître la profondeur du sol, sa teneur en cailloux et sa densité. Par conséquent, une teneur en MO mesurée dans un sol peut correspondre à des stocks différents, en fonction de l'épaisseur de sol, de sa densité et de sa pierrosité. La distinction entre ces deux notions est importante lorsqu'on veut réaliser un bilan humique. En effet, dans ce cas, on s'intéresse à la quantité de MO qui va se minéraliser annuellement, pour la compenser si nécessaire par d'autres apports de matière organique.

## L'ANALYSE AU LABORATOIRE

Ce point est crucial lorsque l'on s'intéresse à la qualité de données obtenues sur des suivis ou des évaluations à long terme. Le plus souvent, la mesure de la teneur en matière organique est en réalité une mesure du carbone du sol, dont la valeur est multipliée par un coefficient conventionnel de 1,72 (ou 1,724 selon les laboratoires).

Les méthodes de mesure dites de « combustion sèche » sont celles qui sont réputées extraire la plus grande partie du carbone. Les méthodes d'oxydation par voie humide comme celle de Walkley-Black ou Anne, extraient des quantités moindres qui varient selon des valeurs de 70 % (principalement pour les sols tropicaux) à des valeurs très proches de celles obtenues par combustion sèche pour les sols tempérés(4) . La méthode Anne est très largement utilisée en France par les laboratoires d'analyses de terre. Cette méthode normalisée (NF ISO 14235), utilisée en routine au laboratoire LCA, est basée sur une oxydation sulfochromique du carbone (le sol ne contenant pas d'autres corps oxydables que le carbone), suivie d'un dosage par colorimétrie.

Comme le carbone total des sols varie lentement, d'autres indicateurs de l'évolution de compartiments plus sensibles peuvent être appliqués pour détecter de façon précoce des tendances évolutives (i.e. matières organiques particulaires, sucres, enzymes, biomasse microbienne, carbone minéralisable). Ces indicateurs permettent une vision plus précoce des tendances et renseignent sur la qualité des matières organiques. On dépasse ainsi un simple raisonnement sur le niveau.

# QU'IL EST BIO MON INDICE D'ACTIVITE BIOLOGIQUE !

*Publié le 27 octobre 2010*

Le sol est un milieu vivant. Une bonne activité biologique du sol est un préalable à une bonne fertilité générale. Sans cette vie, l'évolution des éléments minéraux dans le sol et leur mise à disposition à la plante ne sont pas possible. Plusieurs déterminations ou indices apportent des éclairages sur cette vie du sol.

L'indice d'activité biologique rend compte des conditions de vie des micro-organismes du sol et de l'importance potentielle des minéralisations. La mesure de la matière organique est quantitative. Encore faut-il que cette matière organique soit active ! L'indice va apporter cet éclairage. Il est aussi à rapprocher de la notion de biomasse microbienne active.

## IL EXISTE DIFFÉRENTS MOYENS D'ÉVALUER CET INDICE :

- **dosage direct** de l'activité biologique par détermination du CO2 dégagé ou de l'O2 absorbé
- **dosage d'activités** enzymatiques spécifiques.
- **modélisation** par la prise en compte des paramètres déterminants du sol.

C'est cette dernière option qui a été choisie par le LCA sur ses rapports d'analyses de terre pour évaluer l'indice d'activité biologique d'un sol.

L'interprétation de l'indice va permettre, par exemple, de moduler les grilles régionales de minéralisation de l'azote pour un plan de fumure plus précis et plus sûr.

Il va donner aussi de précieuses indications sur le bilan soufre du sol, fortement tributaire des conditions de minéralisation.

A un moment où l'agriculteur, avec ses contraintes économiques, cherche à pérenniser son potentiel de rendement sans appauvrir ses sols, la prise en compte de leur activité va prendre une importance considérable.

Le laboratoire LCA propose également, pour approfondir la connaissance de vos terres, des mesures de biomasse microbienne et d'indice d'activité hydrolytique, à travers son laboratoire partenaire Célesta Lab dont le LCA est actionnaire.

# LA BIOMASSE MICROBIENNE

*Publié le 29 juin 2011*

Au cours des dernières décennies, le développement important de la fertilisation minérale a souvent conduit à considérer la terre comme un simple support de culture. Dans ce mode de fonctionnement, l'objectif est de nourrir la plante le plus directement possible. La terre est alors un support dont on analyse uniquement la structure et le contenu en éléments nutritifs.
Dans cette approche la vie microbienne du sol est négligée, et par manque d'outil disponible, l'activité du sol est appréciée uniquement au travers du rapport C/N. Pourtant la fertilité du sol ne se limite pas uniquement aux composantes physiques et chimiques. L'importance des propriétés biologiques est largement reconnue par les agronomes et les agriculteurs. Ce sont les interactions entre ces différentes propriétés qui donnent au sol sa capacité à nourrir la plante sur le long terme. Le sol est une structure vivante et dynamique. En « nourrissant » la terre, notamment avec les apports organiques, l'agriculteur favorise la vie des microorganismes, essentiellement les bactéries et les champignons microscopiques. En retour, ces derniers permettent la transformation, le stockage et la libération des éléments nécessaires à la plante. Depuis Pasteur, la « Microbiologie du Sol », une science relativement jeune, a fait d'énormes progrès dans l'étude de ce monde invisible. Il en ressort une certitude : sans ces microorganismes, les écosystèmes ne pourraient fonctionner et l'homme n'existerait pas.

## BIOMASSE MICROBIENNE

A ce jour, de nombreuses méthodes existent pour quantifier et qualifier la microflore du sol, mesurer ses activités, mais pour la plupart, restent du domaine de la Recherche et rares sont celles qui peuvent être utilisées en routine par des laboratoires de diagnostic des sols. Récemment, cependant, une méthode de mesure de la biomasse microbienne (ensemble des microorganismes du sol : bactéries, champignons, actinomycètes etc… ) d'un sol a été inventée par des chercheurs anglais, puis perfectionnée et simplifiée par d'autres chercheurs[i]. Cette méthode fait l'objet actuellement d'une norme expérimentale ISO (FD ISO 14240-2, Décembre 1997). En France, cette approche a été développée et vulgarisée par M. Rémi Chaussod (INRA Dijon).

Elle consiste à fumiger un échantillon avec du chloroforme (ce qui a pour effet de tuer les microorganismes vivants du sol), puis à extraire immédiatement et doser le carbone des corps microbiens. Éventuellement l'azote, le phosphore ou encore le soufre peuvent aussi être dosés. ***> Plus d'informations sur la méthode de mesure de la biomasse microbienne sur WikiLCA.***

La biomasse microbienne est donc une mesure globale, représentant une quantité de carbone « vivant » dans le sol.
D'un point de vue agronomique, la biomasse microbienne est présentée comme l'un des indicateurs biologiques les plus fiables et les plus sensibles par de nombreux chercheurs nationaux et internationaux. Présentant un taux de renouvellement de 6 à 18 mois, elle répond rapidement, de manière très sensible, à de nombreux facteurs agro-pédologiques.

La mesure de la biomasse (BM) peut servir à calculer d'autres indicateurs comme le rendement microbien, défini comme le rapport BM / Corganique et exprimé en %. C'est le pourcentage de biomasse microbienne par rapport à la quantité globale de carbone du sol. Plus cette valeur est forte et plus l'environnement physico-chimique et la qualité de la matière organique sont favorables à la production de biomasse microbienne. En ce sens on peut parler d'indicateur d'efficacité de la matière organique à produire de la biomasse microbienne.

## POUR QUE LES MICROBES SOIENT AU RENDEZ-VOUS…

Les prélèvements de sols pour analyse de la biomasse microbienne, et plus généralement pour les mesures d'activités microbiennes sont essentiellement faits dans l'horizon superficiel des sols, correspondant à l'horizon travaillé ou modifié par les racines (0-15 cm à 0-30 cm). Les périodes les plus favorables sont l'automne et le printemps, ainsi que l'hiver pour le sud de la France. La sécheresse ou la présence de culture limitent l'intérêt des prélèvements estivaux. Les prélèvements sont faits par carottage et échantillonnage d'une placette considérée comme homogène par rapport aux caractéristiques de sol, de culture, et du comportement des plantes. Une fois prélevé, l'échantillon ne doit pas être exposé à des températures extrêmes (congélation ou chaleur), et doit être expédié rapidement au laboratoire par transport express (24 h à 48 h). En cas d'impossibilité d'expédition, les échantillons peuvent être conservés au froid (4°C) et en aérobiose plusieurs jours.

## QUELQUES APPLICATIONS AGRONOMIQUES

La mesure de la biomasse microbienne a été utilisée avec succès dans la mise en évidence de l'impact de différents facteurs culturaux ou pédologiques sur la biologie du sol.

**> Biomasse microbienne et pH des sols** : effets positifs du chaulage. L'apport de calcium à des sols non saturés comme l'effet neutralisant des amendements calciques améliorent bien souvent la richesse microbienne du sol, tous les autres paramètres étant égaux par ailleurs ;
**> Biomasse microbienne et gestion des produits organiques** : comme tous les êtres vivants hétérotrophes, la BM a besoin de carbone et d'énergie pour survivre et se développer. Toutes les matières organiques ne sont pas aussi efficaces pour produire de la BM. Les matières organiques les plus riches en matières facilement biodégradables, sucres solubles, acides aminés, protéines, hémicellulose, cellulose seront naturellement plus efficaces que les produits plus stables, ligneux ou compostés ;
**> Biomasse microbienne et texture des sols :** les textures grossières sont moins aptes à héberger et à protéger la BM que les textures fines qui offrent par leur agrégation naturelle une meilleure protection.
**> Biomasse microbienne et état structural d'un sol (tassement, compaction)** : des travaux en viticulture menés par l'ITV de Nîmes Rodilhan (aujourd'hui IFVV), ont montré que la BM était limitée par le tassement d'un sol, estimé in situ par mesure de la densité apparente. On peut supposer qu'en limitant la porosité, le nombre de sites pouvant héberger la vie microbienne est diminué. Parallèlement les périodes hydromorphiques de surface sont plus fréquentes, limitant également le développement microbien.
**> Biomasse microbienne et fumures organiques vs minérales** : les fumures organiques, en apportant simultanément, le carbone, l'énergie et éventuellement l'azote, stimulent fortement le développement microbien. Les fumures minérales auront peu d'impact direct sur la BM. Seul l'apport d'azote minéral, lorsqu'il est limitant, en particulier s'il y a un excès de carbone assimilable au sol (restitution des pailles par exemple), aura un effet bénéfique sur le développement de la BM.
**> Biomasse microbienne et traitement des cultures** : si, qualitativement, il a été montré que les produits phytosanitaires affectent la biodiversité et le fonctionnement de certaines populations microbiennes en fonction du produit et de la dose utilisée, quantitativement, la biomasse microbienne est généralement peu sensible aux traitements phytosanitaires appliqués à des doses homologuées. En revanche, les effets dépressifs du cuivre sur la microflore du sol, en particulier dans les systèmes viticoles ou arboricoles, ont été largement étudiés en France.

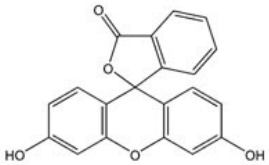
# QUAND LA BIOMASSE S'ÉVEILLERA…

*Publié le 7 juillet 2011*

La mesure de la biomasse microbienne constitue une première étape dans la connaissance de l'activité biologique des sols. Cependant elle n'est pas exhaustive. Quantifiant de façon globale le carbone « vivant » du sol, d'origine microbienne, cette mesure devrait être systématiquement associée à des mesures qualitatives de la biomasse. En effet à quantité égale de microbes, i.e. à biomasse microbienne constante, ceux-ci peuvent être plus ou moins actifs. Les deux composantes, quantitatives et qualitatives, sont donc capitales pour bien apprécier l'activité biologique d'un sol. Intéressons-nous à l'un des moyens à notre disposition pour évaluer l'efficacité du travail des microbes : la mesure des activités FDA hydrolases.

## LA PREUVE PAR L'IMAGE

Il existe sans doute au niveau du sol des milliers d'activités microbiennes sensu stricto. Les mesures d'activités enzymatiques constituent une approche intéressante : elles sont directement reliées au métabolisme de la microflore et faciles à mettre en œuvre au laboratoire. Les enzymes sont des macromolécules, essentiellement des protéines, synthétisées par les êtres vivants et qui catalysent des réactions chimiques. Parmi ces réactions, on peut citer le réarrangement d'une molécule, l'ajout ou la soustraction de composants. Les Fluorescéine Di-Acétate (FDA) hydrolases, utilisées pour la mesure de l'activité microbienne, présentent cette dernière propriété. La FDA est utilisée comme un colorant vital des champignons, bactéries et protistes depuis de nombreuses années (Guilbault et al, 1964). Le produit est transporté à l'intérieur des cellules vivantes où il subit une hydrolyse par un très large spectre d'enzymes (acétyl-estérases, estérases, lipases, protéases). La réaction conduit à l'apparition de fluorescéine. Compte tenu de sa polarité, la fluorescéine est stockée dans la cellule microbienne. Elle n'est libérée dans l'environnement qu'une fois la capacité de stockage de la cellule dépassée. La fluorescéine tient son nom de ses propriétés fluorescentes ! Elle peut être repérée dans les cellules à l'aide d'un microscope fluorescent et même quantifiée par spectrophotométrie à 490 nm (Schnurer et Rosswall, 1982). Visible dès de faibles concentrations, la fluorescéine connaît d'ailleurs d'autres usages dans le domaine environnemental et médical.

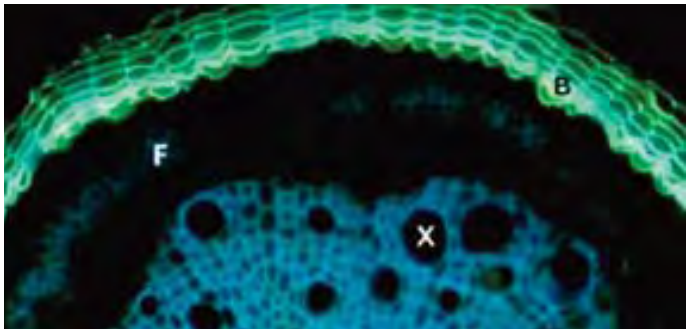


Molécule de fluorescéine

## OBSERVER, COMPRENDRE ET MESURER

La microflore du sol est essentiellement hétérotrophe. Elle tire son énergie et sa nourriture des substances organiques qui l'entourent. Ce sont ces FDA hydrolases, dont elle est naturellement pourvue, qui lui permettent de se nourrir et de se développer au quotidien en coupant des liaisons Carbone - Carbone. La quantité d'enzymes actives à un instant donné dans la totalité de la microflore du sol est globalement proportionnelle à l'activité biologique, c'est-à-dire à la minéralisation de la matière organique du sol.

En ce sens, la mesure des FDA hydrolases peut remplir l'objectif d'avoir un indicateur rapide et simple de l'activité totale de la microflore hétérotrophe dans un sol.




## AU LABORATOIRE

La méthode de mesure mise en place par Celesta-lab s'appuie sur les travaux de Schnurer et Rosswall (1982). Elle s'applique à des échantillons de terre fraîche tamisés à 5 mm. L'équivalent de 3 g de terre sèche est placé en contact avec une solution tamponnée à pH 7,6. L'ensemble est mis en incubation à 28°C. La réaction est arrêtée au bout d'une heure par l'ajout d'acétone. La quantité de fluorescéine libérée, qui traduit l'activité de la microflore, est estimée par une mesure colorimétrique à 490 nm. Le résultat est exprimé en u nité optique : Activité FDA hydrolase = A490 / h

## APPLICATIONS AGRONOMIQUES

L'interprétation est basée sur un principe simple : plus la quantité de fluorescéine libérée par unité de temps est élevée, plus l'activité microbienne est élevée.

La gamme de valeur de l'activité FDA hydrolase s'étend de moins de 0,050 A490/h à plus de 0,600 A490/h. Les variations de l'activité FDA ont pu être reliées, dans diverses expérimentations, à des variations de la consommation d'oxygène (Schnurer et Rosswall, 1982), à des modifications qualitative ou quantitative de la microflore, à des modifications du taux de matière organique des sols, à des modifications de l'assolement ou des techniques du travail du sol etc… (Schnurer et al, 1985 ; Burket et al, 1998 ; Haynes et Williams, 1999). Les activités FDA hydrolases répondent très sensiblement aux modifications de fertilisation. Les variations des activités FDA reflètent également bien les variations qualitatives (activités micro biennes, type de microflore) et quantitatives de la microflore (biomasse microbienne) du sol.

La mesure de l'activité FDA hydrolase est intéressante à différents titres : simple et rapide, elle donne une image objective de l'activité de la biomasse microbienne à un instant donné. Elle fournit une information complémentaire à la mesure de biomasse microbienne, approche uniquement quantitative. Biomasse microbienne et activité FDA hydrolase : ces premiers outils nous permettent d'initier une approche de la composante biologique du sol, élément indispensable et incontournable dans l'élaboration d'une agriculture durable et responsable.

**LCA vous parle de Celesta-lab**

Déjà plus de 10 ans… C'est en 2000 que le laboratoire LCA commence à explorer l'univers de la biologie des sols. A la recherche de fortes compétences sur ce sujet, nous rencontrons Xavier Salducci, chercheur et expert dans ce domaine. Le LCA participe alors comme actionnaire par augmentation de la moitié du capital de Alma Terra, qui deviendra par la suite Celesta-lab. Cet apport financier ainsi que le réseau commercial du LCA permettront le fort développement de Celesta-lab, entretenu par l'intérêt grandissant porté à la biologie des sols et à l'utilisation agricole de produits organiques

# QUE FAIRE DE LA RHIZOSPHERE ?

*Publié le 23 mai 2012*

La plante cultivée est l'interface entre deux systèmes : l'atmosphère et le sol. Le végétal est loin d'être passif dans son environnement. Si les échanges aériens, énergétique ou gazeux (eau, gaz carbonique…), sont assez bien décrits, les échanges entre la plante et le sol restent peu connus, car, par nature, difficiles à appréhender.

La constance de la circulation d'eau et de solutés (ions ou molécules) est à la base de la vie du végétal ; elle est sous le contrôle de l'énergie reçue par les feuilles et sous la dépendance du bon fonctionnement racinaire. Les transferts sols / racines sont beaucoup plus complexes que les transferts atmosphère / feuilles. Ils s'effectuent au niveau de la rhizosphère, lieu mythique du physiologiste et de l'agronome.

## RHIZOSPHÈRE ET « PRODUCTIONS » RACINAIRES

La rhizosphère est le volume occupé par les racines d'une plante ou influencé par elles. C'est la zone d'échange entre le végétal et le substrat, totalement colonisée par les micro-organismes. Le terme d'échange est ici essentiel. Dès qu'un végétal est capable de synthétiser des substances organiques, il en destine une partie à la croissance radiculaire mais aussi à la nutrition des micro-organismes, grâce aux « productions » racinaires (exsudats à diffusion passive, sécrétions consommant de l'énergie, cellules mortes et lysats).
Ces émissions racinaires peuvent représenter jusqu'à 30% des produits de la photosynthèse. La part énergétique utilisée par la « consommation racinaire », regroupant les émissions racinaires et la croissance radiculaire, est même parfois concurrente de la partie aérienne (cas de chute physiologique en cerisiers par exemple).
Les exsudats et sécrétions sont constitués majoritairement de mucilages (mélange de sucres complexes et de protéines devenant visqueux au contact de l'eau) mais aussi de sucres simples, d'acides aminés, d'enzymes, de phénols, d'hormones, de vitamines….

**Ils ont un rôle fondamental car :**

- Ils protègent l'extrémité (méristème apical) de la racine permettant son élongation (avec une grande analogie avec les méristème apicaux des organes aériens, notamment en termes de régulation hormonale).
- Ils participent, par l'effet « colle » des mucilages, à la cohésion des particules du sol en complément des substances émises par les micro-organismes. Cet effet, sur la porosité, souvent appelé « faux complexe », est pourtant, dans certains types de sols ou climats, plus présent que celui lié au fameux Complexe Argilo Humique.
- Ils augmentent les possibilités d'adaptation et de résistance des végétaux.
- Ils permettent la phytoremédiation (dépollution du sol ou de l'eau par les plantes) notamment en complexant les Eléments Traces Métalliques. Ils ont parfois un effet télétoxiques (émission, pour éviter la concurrence, de substances toxiques aux autres espèces, voire aux graines ou plants de la même espèce) et expliquent en partie les phénomènes de « fatigue des sols ».
- Ils assurent la fourniture énergétique de nombreux micro et macro organismes du sol qui, en retour, favorisent la croissance et de développement de la plante. L'activité et la biomasse microbienne sont toujours plus importantes (on parle souvent d'un facteur 100) dans un sol avec racines que dans un sol sans racines.



## RHIZOSPHÈRE ET RHIZODÉPOSITION

Les caractéristiques et spécificités de la rhizosphère sont en grande partie déterminées par la nature des productions racinaires, la plante essayant ainsi d'adapter et de contrôler son environnement. Il a été observé, par exemple, que la composition des exsudats varie en fonction de tel ou tel stress subi par la partie aérienne du végétal. Cette injection directe de carbone par les racines constitue la rhizodéposition. Ce phénomène, qui pourrait représenter jusqu'à 40% des entrées de carbone au sol, est rarement pris en compte dans les calculs.

Les recherches sur la quantification et la modélisation de la rhizodéposition, en lien avec l'architecture racinaire, ont une grande importance pour comprendre la mise à disposition des éléments minéraux du sol à la plante. A terme, peut-on contrôler et stimuler la rhizodéposition ? Des essais sur maïs ou plantes maraîchères semblent très prometteurs.

## RHIZOSPHÈRE ET ACIDIFICATION

Avec l'action physique des racines et l'exsudation, le contrôle du pH est la troisième action possible du végétal pour modifier son environnement racinaire. Le pH de la rhizosphère est le plus souvent différent de celui du sol ambiant, un écart de 2 points étant fréquent. Cela améliore la solubilité et la mise à disposition des éléments nutritifs.

L'intensité de la vie biologique dans la rhizosphère, la production d'acide carbonique due à la respiration, expliquent cette variation de pH, mais les cellules racinaires peuvent également excréter des protons ou des acides organiques pour maintenir les équilibres ioniques. Le solde est souvent une acidification, mais une alcalinisation du milieu est parfois possible.

## RHIZOSPHÈRE ET MICRO-ORGANISMES

Ce n'est pas l'objet de cet Agro-Reporter, il en faudrait plusieurs, de lister les organismes intervenant sur la rhizosphère souvent spécifiques à telle ou telle espèce : bactéries, champignons,nématodes, protozoaires, collemboles… De même, leurs interventions sur le végétal sont nombreuses : directes (solubilisations, synthèse de substances de croissance, protection contre les pathogènes, fixation d'azote….) ou indirectes (sources de composés carbonés facilement assimilables). Un prochain Agro-Reporter développera, du fait de son importance, la notion de mycorhizosphère.

A noter que la respiration des racines et des microorganismes de la rhizosphère consomme de l'oxygène et diminue le potentiel d'oxydo-réduction local, ce qui facilite l'absorption de certains cations, le fer notamment.

[…]

[...]

## RHIZOSPHÈRE ET SOLUTION DU SOL

La solution du sol est l'eau contenant des éléments minéraux dissous et chargés électriquement qui circule dans les espaces libres ou pores du sol. C'est le lien entre la terre au sens strict et la rhizosphère.

L'analyse de la solution du sol au laboratoire (qu'elle provienne d'un Extrait à l'Eau, d'une Pâte Saturée ou d'un prélèvement lysimétrique) donne un aperçu de la mise à disposition minérale du sol en lien avec le Complexe Argilo Humique et les risques de blocage (pH…). Surtout utilisée en maraîchage et en grande culture (les reliquats azotés étant des extraits à l'eau) et dans les sols à risque de salinité, l'analyse de la solution du sol apporte des informations pertinentes sur la disponibilité de tel ou tel élément minéral et prend tout son intérêt quand on la compare à l'analyse de sol « classique » ( par extraction forte). Par contre, elle reste très éloignée, dans sa composition, de « l'eau rhizosphérique ».

La prise en compte analytique de la rhizosphère est en effet techniquement difficile, voire impossible. Cela explique, par exemple, les difficultés d'approche analytique du phosphore réellement disponible à la plante (le « Graal de tout agrochimiste ») tant les liens de cet élément avec la biologie du sol sont complexes.

## QUE FAIRE DE LA RHIZOSPHÈRE ?

La rhizosphère est le point de rencontre entre le monde végétal, biologique et minéral. On comprend que l'on est face à de multiples phénomènes totalement dynamiques et intimement liés entre eux, difficiles à appréhender.
Pour l'instant, les outils d'analyses utilisables en agronomie permettrent d'apprécier le potentiel (sol, extrait à l'eau) et le résultat (analyses de végétaux), mais pas directement la rhizosphère. Les nouvelles approches, notamment les quantifications du niveau et de l'activité biologique apportent des informations exploitables. On peut parler également de la distinction à faire entre le sol non rhizosphérique et le sol rhizosphérique, profondément modifié par les racines et représentant de 1% à 100% (en prairie permanente) du sol superficiel.

Sur le terrain, le mieux est sans doute d'adopter à la fois une attitude de bon sens et d'ouverture : tout faire pour favoriser le développement, la colonisation et l'activité radiculaire des plantes cultivées pour augmenter les surfaces d'échange du végétal avec le sol en restant ouvert aux méthodes « alternatives » (probiotiques, mycorhizations…) qui commencent, dans certains cas, à donner des résultats intéressants.

# LIRE DANS LES LIGNES DE LA TERRE

*Publication du 7 mars 2013*

L'analyse de terre n'est souvent utilisée que pour apprécier la fertilisation à apporter aux cultures. Cet usage, certes essentiel, est cependant réducteur par rapport aux informations qu'elle peut apporter.
Pour aller plus loin que le simple commentaire affiché sur les rapports d'analyses de terre, cet Agro Reporter montre que l'analyse de terre peut aussi aider à choisir le type de travail du sol le mieux adapté à la parcelle, notamment en raisonnant sur les paramètres biologiques. Labour, Technique Culturale Simplifiée (TCS)… ? Pour l'agronome, il n'y a pas de choix technique à favoriser a priori. Il y a par contre des méthodes plus adaptées à tel ou tel type de parcelle, ou à tel ou tel objectif.

## PLUS LOIN QUE LA TEXTURE : LA QUALITÉ DU COMPLEXE ARGILO HUMIQUE

La texture d'un sol (proportion d'argile, de sables…) explique en grande partie les conditions de développement et de fonctionnement radiculaire (perméabilité, humidité, tassements, compactages…). Fondamentalement, l'un des buts du travail du sol est de placer la graine et les racines dans les meilleures conditions de fonctionnement (qualité du contact, homogénéité…). Ce sujet a été développé dans une série précédente d'articles de l'Agro Reporter (« Toucher terre »), dédiée à l'analyse granulométrique et à son utilisation.

Une approche « physique » de la granulométrie, complétée par la profondeur du sol et la proportion de cailloux, donne déjà des informations intéressantes pour le choix d'une technique culturale (voir le récent Agro Reporter « Pierres qui roulent»). Par exemple, les risques de manque d'aération ne seront pas à prendre en compte dans un sol riche en sables grossiers. De même, un sol argileux a souvent des capacités de restructuration naturelle par les conditions climatiques.

Ce risque sera par contre évident en sol limoneux. C'est donc souvent dans cette gamme de sol que se pose le problème du choix de la technique culturale.

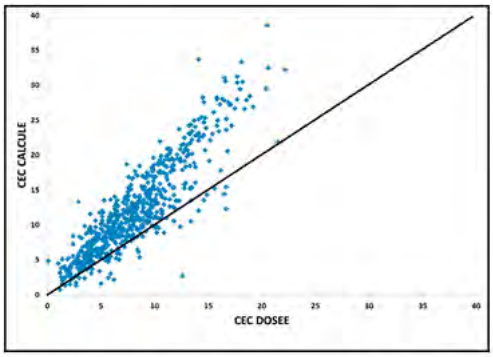
C'est aussi dans ces sols limoneux, surtout s'ils sont pauvres en argile, qu'une vision agronomique trop basée sur une approche minérale du Complexe Argilo Humique (CAH) atteint ses limites. Elle considère que la liaison entre les argiles et l'humus, tous deux de charge négative, se fait par des ions positifs (calcium mais aussi fer, manganèse, aluminium…) et permet d'expliquer les notions de complexe adsorbant et de floculation du sol.

Pour aller plus loin, une première étape plus « biologique » consiste à montrer que ce complexe, parfois très fragile s'il n'est pas assez lié au calcium (sols neutres ou acides), est protégé par une colle organique, la glomaline, produite essentiellement par les champignons mycorhiziens. Cette protection est surtout efficace contre la dégradation de la structure du sol par l'action de l'eau.

Une deuxième étape consiste à réaliser que la structuration des particules par le CAH n'est à l'origine que de 40 à 60% des agrégats du sol selon les sources. Dans les autres cas, la cohésion des particules du sol est réalisée par des exsudats racinaires (mucilages) ou par la glomaline.
Ainsi, dans un sol limoneux, où l'analyse montre un CAH peu présent, les techniques culturales devront favoriser le maintien d'un structure correcte par un entretien ou un regain de l'activité biologique (cultures intercalaires amélioratrices, arrêt du labour…).

## PLUS LOIN QUE LA CAPACITÉ D'ECHANGE EN CATIONS (CEC)

Un précédent Agro Reporter avait montré la différence entre argiles vraies et argiles granulométriques (relire Toucher terre ). De plus, même si l'on est bien sur des argiles vraies, toutes les argiles n'ont pas la même capacité à retenir et échanger les ions. Il est possible de déterminer la nature des argiles présentes dans un sol, mais à un coût très élevé. La mesure de la Capacité d'Echange en Cations (CEC) est alors intéressante à comparer au niveau en argiles et à teneur en matière organique. Un écart entre la CEC mesurée au laboratoire et la CEC calculée (idéal théorique), s'expliquera par la présence de « fausses » argiles ou d'argiles de mauvaise qualité (l'argile expliquant environ 60% de la variabilité de la CEC) ou de matières organiques peu actives. Cet écart entre CEC dosée et CEC théorique idéale est un indicateur intéressant pour apprécier la réalité du CAH dans un sol et, par extension, l'effet négatif ou positif d'une opération culturale.




*Ecarts entre CEC dosée (Metson Cmol+/kg) et CEC théorique. Source LCA*

## PLUS LOIN QUE LE PH ET L'ÉTAT CALCIQUE

La gestion des amendements minéraux basiques (chaulage) répond à plusieurs objectifs :

- placer les racines de l'espèce concernée dans les meilleures conditions de pH par rapport à ses exigences,
- assurer la nutrition en calcium,
- structurer le sol par le biais du complexe argilo-humique,
- favoriser l'activité biologique des sols.

Ce dernier objectif, souvent oublié, participe pourtant à la réussite des trois premiers… Ainsi, le fameux diagramme de TRUOG (1948) d'assimilabilité des éléments en fonction du pH devrait être systématiquement complété par l'effet de l'acidité ou de l'alcalinité du sol sur la vie biologique.

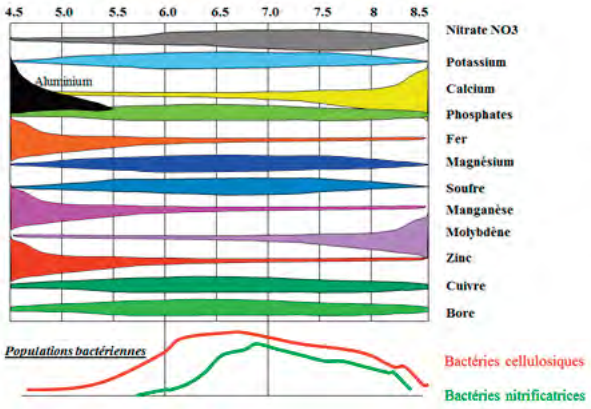



*Diagramme d'assimilabilité des éléments minéraux en fonction du pH du sol et niveau des populations bactériennes (d'après Truog et Bachelier)*

[…] P.45

[...]
Ainsi la vision uniquement physicochimique du sol évolue progressivement vers une appréciation plus basée sur la vie du sol où une part importante de la disponibilité minérale et de la structuration du sol est liée à l'état biologique (biodisponibilité).

Cela nous rappelle également que la gestion du pH et de l'état calcique est souvent prioritaire par rapport à des apports organiques. En effet, à quoi sert d'apporter de la matière organique (ou d'enfouir les résidus de récolte) si la faune et la flore du sol ne sont pas à même de l'utiliser et de la transformer ?

Une prise en compte du pH du sol et du potentiel d'acidification (voir Duo de pH au menu) est donc nécessaire dans toute approche de Technique Culturale Simplifiée visant à favoriser la vie biologique.

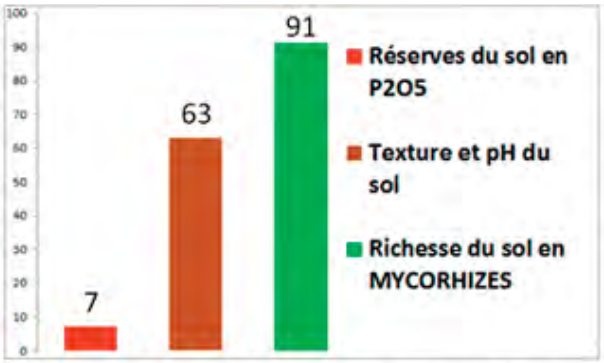
## QUID DES RÉSERVES ET DE LA DISPONIBILITÉ MINÉRALE ?

La lecture du potentiel minéral du sol doit se faire en deux étapes :

- L'élément minéral est-il suffisamment présent au sol ?
- L'élément minéral est-il disponible ?

Le rapport d'analyse de terre donne directement la réponse à la première question. La disponibilité minérale, très multifactorielle, est par contre plus difficile à apprécier : état hydrique du sol, pH, état structural, température du sol au moment des prélèvements par les racines, activité biologique….

La figure ci-dessous illustre, pour le phosphore, cette complexité. La présence de phosphore dans les organes du végétal est très peu corrélée aux réserves du sol (leur appréciation reste cependant indispensable) mais étroitement liée à la présence de mycorhizes. Les conditions de pH du sol et de porosité, estimée par la texture, sont par ailleurs des facteurs d'explication du bon développement des mycorhizes.




*Part d'explication (en %) de 3 données analytiques sur la présence du phosphore dans les organes du maïs (d'après J. HARDANE – ESERCA 1993 – P2O5 Olsen)*

Ainsi, le choix de la technique culturale à effectuer doit se faire aussi en fonction de la mise à disposition minérale qu'elle entraîne. Dans un sol où la disponibilité en phosphore est limitante, un travail du sol trop mécanique perturbant la vie biologique pourra être négatif à ce niveau. L'effet pourra être contraire pour la mise à disposition du potassium, plus lié à la qualité du flux hydrique dans le sol.

A noter que ce type d'approche montre également l'intérêt de l'analyse de végétal, même en grande culture, une simple lecture de l'analyse de sol ne permettant pas d'affirmer que l'élément minéral est bien « passé » dans le végétal. Elle montre également qu'une analyse de terre limitée à une appréciation des seules réserves chimiques n'est pas suffisante.

## AUTRES INDICATEURS

D'autres indicateurs présents sur l'analyse de terre peuvent également être des critères de choix d'une méthode culturale :

- le potentiel biologique du sol, estimé (voir « Qu'il est bio mon indice d'activité biologique ! ») ou dosé (voir « Quand la biomasse s'éveillera »),
- l'état réducteur du sol (par exemple le niveau d'oxydo-réduction du manganèse),
- l'état de salinité (avec des risques d'agressions racinaires temporaires s'il est trop élevé), apprécié par la conductivité,
- le rapport C / N,
- ...

On voit que l'analyse de terre peut être une source d'information sur le type du travail du sol le mieux adapté. Les agronomes de LCA travaillent à des critères spécifiques pour faciliter ce choix. Bien évidemment, cet outil sera toujours à compléter par une observation régulière du sol, notamment pour apprécier l'effet des pratiques culturales sur la structure, le développement racinaire, l'état hydrique…

Une prochaine étape, développée par LCA, permettra au producteur d'apprécier, en termes de suivi instantané, l'effet de ses pratiques culturales sur la vie biologique du sol.

L'équipe d'agronomes de LCA est à votre disposition pour répondre à vos questions et échanger sur ces problématiques.

# LES SOLS SALÉS

*Publié le 22 décembre 2010*

Les sols des marais de l'Ouest (de Saint-Nazaire au Médoc) représentent une superficie de 250 000 ha. Ils trouvent leur origine dans des dépôts marins dont la teneur en calcaire varie avec l'origine des sédiments : rivière, plateau continental,…

Les caractéristiques de ces sols (teneurs élevées en argile et en matière organique, calcaire, salinité, sodicité) rendent leur exploitation complexe.

En effet, bien que chimiquement fertiles, l'aptitude agronomique de ces sols est principalement déterminée par leur stabilité structurale. Cette dernière est fonction des teneurs en calcaire, matière organique et sodium. Les deux premiers paramètres auront une action favorable sur la stabilité structurale. A contrario, la sodicité entraînera des problèmes de structure qui peuvent, s'ils sont mal maîtrisés, rendre un sol impropre à la culture, en dehors de prairies peu productives.

La maîtrise de la salinité est l'autre problème majeur rencontré dans les marais de l'Ouest. La salinité se traduit, au départ, par un rabougrissement du végétal et une diminution des rendements, puis, dans les cas extrêmes, elle conduit à des flétrissements, nécroses et mortalités. Dans un premier temps, ce phénomène s'explique par une concurrence nutritionnelle entre éléments minéraux au niveau de la rhizosphère (l'excès de sodium bloquant le calcium par exemple) ; dans les cas graves les problèmes deviennent hydriques, puis physiques (l'excès de concentration minérale de la solution du sol ne permettant plus à l'eau d'entrer, par osmose, dans les racines et allant même jusqu'à les dégrader).

La première opération à réaliser, indispensable à la valorisation de ce type de sols, est la mise en place d'un drainage adapté. Ensuite, un gypsage approprié, des modes de conduite adaptés (nature des engrais, fractionnement...) et le choix d'espèces tolérantes contribuent à contrôler les problèmes de sodicité.

L'INRA de Saint-Laurent-de-la-Prée a travaillé dans les années 70-80 à la mise en valeur agricole de ces terres, jusque là inexploitées.

Le laboratoire LCA a participé à ces travaux en mettant au point une méthode d'extraction spécifique. En effet la méthodologie classique pour l'extraction de bases échangeables ne peut être appliquée sur ce type de sol. Notre protocole permet de caractériser ces terres salées (CEC dérivée de la méthode Metson, sodium soluble et total, rapport Na/CEC, cations strictement échangeables). Cette caractérisation précise permettra à l'agriculteur d'adapter ses pratiques culturales aux spécificités de ses parcelles.

A noter également que l'excès de salinité est un des problèmes majeurs de développement des cultures dans de nombreux pays (Magreb, par exemple), soit en raison de sols naturellement salins, soit en conséquence de cultures trop intensives sur des sol fragiles .

***Définitions :***

***Salinité** = présence de sels, en général sodium et chlorure, mais aussi magnésium et potassium, dans la solution du sol ; la salinité est évaluée au laboratoire par la conductivité électrique (extraction 1/5 selon NF ISO 11265) ; elle peut avoir pour origine une inondation par de l'eau salée, récente ou ancienne, ou une présence de dépôts salés fossiles.*

***Sodicité** = fixation dominante de sodium sur le complexe argilo-humique ; la sodicité est évaluée au laboratoire par le rapport Na échangeable / CEC ; elle est responsable sur le long terme des problèmes de structures (dispersion des argiles, prise en masse du sol) ; on peut agir sur la sodicité par gypsage.*

***Gypsage** = apport de gypse (sulfate de calcium) sur un marais sodique pour faire baisser la quantité de sodium fixée sur le complexe argilo-humique ; le calcium apporté prendra sur le complexe la place du sodium, qui, se retrouvant en solution, sera évacué grâce aux pluies par lessivage ou drainage (nécessité impérative d'être en période pluvieuse, automne par exemple, et d'avoir une parcelle drainée).*

# SÉCHERESSE : QUELQUES PISTES POUR RÉDUIRE SON IMPACT EN AGRICULTURE

*Publié le 19 mai 2011*

Beaucoup de régions françaises subissent actuellement des manques d'eau importants avec de graves conséquences sur le niveau des récoltes, voire sur la survie de certaines plantes. En effet, la disponibilité en eau est, avec l'oxygénation du système racinaire et la présence de dioxyde de carbone pour la photosynthèse, l'un des trois facteurs majeurs de fonctionnement et de développement des plantes cultivées. C'est que l'eau, qui constitue de 75 à 95% de la matière fraîche des organes végétaux, intervient dans la quasi totalité des fonctions vitales (structure et rigidité des organes, hydratation des cellules, transfert des éléments minéraux et des substances élaborées, main

## PEUT-ON DIMINUER LES EFFETS DE LA SÉCHERESSE SUR UNE CULTURE EN PLACE ?

Le manque d'eau va limiter le développement et raccourcir la durée du cycle physiologique. Le mode de conduite devra s'adapter pour ne pas accentuer cette tendance, sans s'y opposer toutefois.

***Par exemple :***

- L'excès d'azote, en favorisant les phases végétatives, va augmenter la sensibilité à la sécheresse ; à l'inverse, le manque d'azote va accélérer la succession des phases physiologiques. Un point important à signaler est qu'il n'y a pas de rattrapage possible ; ainsi, si le stade physiologique d'un apport d'azote est dépassé, il est inutile, voire dangereux, de l'effectuer. En conditions sèches, il est également important de veiller à ce que les éléments minéraux qui permettent de valoriser l'efficacité de l'azote ne soient pas limitants (magnésium, fer, manganèse, soufre…).

- Le potassium a un effet contraire à l'azote (ralentissement de l'axe végétatif quand il est en excès et phases reproductives difficiles lorsqu'il est déficitaire). Par exemple, une fumure de fond excessive en potassium va pénaliser les phases végétatives ; à l'inverse, un déficit en potassium augmente l'évaporation foliaire. Dans les pays secs, la maîtrise du rapport N/K2O de la fertilisation (en niveau, mais aussi en positionnement dans le temps) est à la base de la nutrition.

- Les déficits nutritionnels en phosphore et calcium, en ne permettant pas une bonne activité racinaire et une structuration correcte du végétal, accentuent la sensibilité à la sécheresse. En conditions sèches, les rapports N/P2O5 et N/CaO de la nutrition doivent être plus faibles.

- L'accompagnement foliaire à support azoté est un moyen de maintenir une certaine activité végétative quand le système radiculaire ne fonctionne plus. De même, certains produits foliaires (à base de calcium notamment) semblent avoir un effet physique intéressant sur la limitation de la transpiration foliaire (en vigne par exemple).

- En conditions sèches, la plante sera d'autant plus sensible à tout stress supplémentaire : attaque parasitaire, utilisation de pesticides agressifs, concurrence des adventices ….

- Il est également important de noter, pour les producteurs qui disposent d'un système d'irrigation, que les manques d'eau les plus dangereux sont ceux de début de cycle. Ils vont directement impacter la germination et l'implantation des racines des plantes annuelles et, pour les plantes pérennes, la production de l'année mais aussi le potentiel des années suivantes.

Pour les cultures irriguées, l'excès d'eau peut aussi être néfaste. En chassant l'oxygène du sol, l'eau apportée en excès va arrêter temporairement le fonctionnement des racines, voire même les dégrader. Ce phénomène est souvent un facteur aggravant les effets de la sécheresse. De toute façon, si les températures sont trop élevées, l'air trop sec, ou le vent soutenu, le flux hydrique dans le végétal est arrêté par fermeture des stomates et celui-ci ne prélève plus d'eau.

## COMMENT LIMITER, PAR ANTICIPATION, LES EFFETS D'UN MANQUE D'EAU ÉVENTUEL ?

Le potentiel hydrique d'un sol est en grande partie invariant, lié à sa texture et à sa pierrosité. On parle en agronomie de Réserve Facilement Utilisable. Le producteur peut agir sur ce paramètre, que l'on peut doser ou estimer au laboratoire, par des apports d'amendements organiques, qui augmentent la capacité de rétention en eau du sol. Il peut aussi, si nécessaire, effectuer un entretien du sol en calcium, cet élément étant indispensable pour complexer la matière organique et améliorer ainsi la stabilité structurale. Il faut vérifier également que la matière organique présente au sol est bien efficace et active.

La valorisation de ce potentiel hydrique peut être affectée par des difficultés d'infiltration de l'eau (travail et semis ou plantation dans le sens de la pente, présence d'une croûte de battance..) ou une mauvaise implantation racinaire. Elle peut être améliorée par la gestion du désherbage, les techniques de type binage ou mulching, la présence de haies ou brise-vent et, de façon générale, par toutes les pratiques favorisant la profondeur d'enracinement.

De ce potentiel hydrique du sol (à moduler également par la profondeur du sol et la nature du sous-sol) dépendra le choix des espèces et des précocités des variétés cultivées.

Les prélèvements nutritionnels et le transport des minéraux se faisant dans un milieu aqueux, tous les éléments seront pénalisés par un manque d'eau. Globalement, les éléments dont l'assimilation est dite passive (c'est à dire très liée au niveau et à la régularité du flux hydrique dans le végétal) seront les plus pénalisés : azote, potassium, bore, manganèse et, à un moindre niveau, le fer. La réflexion devra donc surtout porter sur ces éléments : fractionnement, solubilité de l'engrais, voie foliaire…

Par ailleurs, les périodes d'assimilation n'étant pas les mêmes pour chaque élément minéral, tout dépend aussi du stade physiologique subissant le manque d'eau : c'est le cas, par exemple, des carences potassiques en vigne en cas de canicule en été (période où les besoins en potassium sont les plus élevées) alors que le sol est parfois saturé en K2O, ou des déficits de mise en réserve du bore en arboriculture après un été très sec. La connaissance des relations entre les conditions climatiques et la nutrition minérale est un axe important des recherches sur la fertilisation des plantes.

# IRRIGATION EN CLEF DE SEL

*Publié le 27 avril 2012*

L'eau, même douce, contient des sels dissous, en quantité plus ou moins importante. L'irrigation, année après année, par une eau même très légèrement salée, va augmenter la quantité de sels dans le sol : l'eau est en effet absorbée par les plantes, ou s'évapore, mais le sel, qui ne traverse pas la barrière racinaire, est retenu dans le sol. Le phénomène est accéléré et amplifié lorsque cette eau est plus chargée en sels. Or l'augmentation de la teneur en sel des sols entraîne à terme une toxicité pour les végétaux, ainsi qu'une dégradation des sols. En parallèle, l'eau devient de moins en moins facilement absorbable par les plantes, qui doivent consacrer une énergie croissante pour l'extraire du sol. Ainsi les conditions de forte salinité provoquent une sécheresse physiologique et un flétrissement des végétaux, car les racines ne sont plus capables d'extraire suffisamment d'eau du sol, alors que le sol peut sembler encore très humide !

## ZONES CONCERNÉES

Ces phénomènes sont encore plus marqués dans les zones semi arides ou arides, plus exigeantes en irrigation : les quantités de sels accumulées sont directement liées aux doses totales d'irrigation. Ces sels dissous sont essentiellement des ions sodium (Na+), dont l'accumulation va entraîner progressivement la formation de sols sodiques, très peu fertiles. D'après la FAO, la salinisation des sols due à l'irrigation réduit la surface des terres irriguées de 1 à 2 % par an. Les terres semi arides et arides sont les plus touchées (presque un quart d'entre elles). L'Afrique du Nord, le Moyen Orient et l'Inde sont de plus en plus menacées. Si la France n'est pas touchée à grande échelle par ce phénomène, la question de la possibilité d'irriguer avec des eaux salées se pose dans certaines situations littorales, où l'infiltration d'eau de mer induit un risque important de salinité de l'eau d'irrigation, aggravé en cas de sécheresse.

## CRITÈRES DE QUALITÉ DES EAUX D'IRRIGATION

Cinq critères permettent d'apprécier la qualité de l'eau d'irrigation. Ils sont applicables à toutes les cultures :

Barème de qualité en irrigation de cultures annuelles

| | Sévérité du problème | | |
|---|---|---|---|
| | Aucune | Légère | Élevée |
| Salinité / conductivité | < 0,75 mS/cm | 0,75 à 3,0 mS/cm | > 3,0 mS/cm |
| SAR | < 3 | 3 à 10 | > 10 |
| Alcalinité (equiv. $CaCO_3$) en mg/l | 80-120 | | > 200 |
| pH (risque de colmatage) | < 7,0 | 7-8 | > 8,0 |
| Fe en mg/l (risque de colmatage) | < 0,2 | 0,2 – 1,5 | > 1,5 |
| Mn en mg/l (risque de colmatage) | < 0,1 | 0,1 – 1,5 | > 1,5 |

Barème de qualité en irrigation de gazons de golf

| | Sévérité du problème | | | |
|---|---|---|---|---|
| | Aucune | Moyenne | Élevée | Très élevée |
| Salinité / conductivité | < 0,25 mS/cm | 0,25 à 0,75 | 0,75 à 2,25 | > 2,25 |
| SAR | < 10 | 10,1 à 18 | 18,1 à 26 | > 26,1 |
| Chlorures + sulfates en mg/l (brûlure des feuilles) | < 250 | 250 à 400 | > 400 | |
| Bore en ppm (risque de toxicité) | < 1 | 1 à 2 | > 2 | |

Source : MAPAQ, 2005

- **Salinité :** contenu total en sels solubles, apprécié par la conductivité électrique
- **Sodium** : proportion relative des cations sodium (Na+) par rapport au calcium et magnésium, appréciée par le SAR1 (sodium adsorption ratio)
- **Alcalinité et Dureté** : concentration en carbonate (CO32-) et en bicarbonate (HCO3-), en relation avec la concentration en calcium (Ca2+) et en magnésium (Mg2+)
- **Concentration en éléments toxiques** : sodium, chlore, bore par exemple
- **pH** de l'eau d'irrigation



## SALINITÉ

Les principaux sels responsables de la salinité de l'eau sont le calcium, le magnésium, le sodium, les chlorures, les sulfates et les bicarbonates. Une valeur élevée de la salinité traduit une quantité importante d'ions en solution et rend plus difficile l'absorption de l'eau et des éléments minéraux par la plante. Une salinité trop élevée peut causer des brûlures racinaires.
La salinité est souvent évaluée par la mesure de la conductivité électrique (CE), exprimée en mS/cm. 1 mS/cm correspond en moyenne à 640 ppm de sels.
En dessous de 0,70 mS/cm, le rendement des cultures annuelles n'est généralement pas affecté par la salinité. Entre 0,70 et 3,0 mS/cm, le maintien des rendements nécessite des façons culturales adéquates. Par exemple on peut être amené à augmenter la dose d'irrigation en l'associant à du drainage, gypsage…).
**Dans le cas particulier des gazons,** une CE de 0,75 mS/cm est la limite approximative pour la croissance, sans avoir à mettre en place des interventions en relation avec la salinité.

- Sous 0,40 mS/cm, la croissance de la plupart des gazons est bonne.
- Entre 0,25 et 0,75 mS/cm, l'eau peut être utilisée sur les sols présentant un bon drainage et pour les gazons peu sensibles à la salinité (comme la fétuque élevée).
- Entre 0,75 et 2,25 mS/cm, l'eau ne devrait pas être utilisée dans les sols peu drainants. Cette eau ne peut pas être utilisée pour l'irrigation des végétaux sensibles au sel (comme le pâturin des prés ou la fétuque rouge), même sur les sols présentant un bon drainage.
- Au delà de 2,25 mS/cm, l'eau ne doit pas être utilisée en irrigation des gazons.

## SODIUM ET SAR

Le sodium a un impact négatif sur la perméabilité du sol et sur l'infiltration de l'eau. Il remplace le calcium et le magnésium adsorbés sur les feuillets d'argile et provoque la dispersion des particules du sol. Les conséquences observées sont la déstructuration des sols argileux, qui deviennent compacts et risquent une prise en masse, et la réduction de leur perméabilité à l'origine de risques d'asphyxie racinaire. La perméabilité des sols sableux peut ne pas se détériorer aussi vite que celle des sols plus lourds lorsqu'ils sont irrigués avec une eau de forte teneur en sodium, mais un risque potentiel existe.

Mais l'effet du sodium d'une eau d'irrigation dépend aussi de la concentration en calcium et magnésium de celle-ci. Le SAR permet de tenir compte des effets mutuels du sodium, du calcium et du magnésium.
**SAR = Na / √((Ca + Mg)/2)**

**Les éléments doivent être exprimés dans la même unité (meq/L en général).**

- Lorsque le SAR est inférieur à 10, l'eau peut être utilisée pratiquement sur tout type de sol, sans risque notable d'accumulation du sodium à un niveau dommageable.
- Entre 10 et 18, les risques d'accumulation de sodium et de dommages sont réels pour les sols de texture fine et de capacité d'échange cationique (CEC) élevée. Mais l'eau peut être utilisée dans les sols sableux bien drainants.
- Entre 18 et 26, l'utilisation de l'eau peut aboutir à des niveaux dommageables de sodium dans pratiquement tous les types de sols. Les interventions telles que le gypsage et le drainage peuvent être nécessaires pour échanger les ions sodium.
- Lorsque le SAR est supérieur à 26, l'eau est généralement inadéquate pour l'irrigation

[…]

[...]

## ALCALINITÉ ET DURETÉ

Dans la plupart des cas, les carbonates sont présents dans les eaux sous forme de bicarbonates $HCO_3^-$ en équilibre électrique avec des charges positives : calcium ou magnésium.

Ces ions, au contact de l'atmosphère chargée en $CO_2$ et en présence de calcium, précipitent sous forme de carbonates calciques $CaCO_3$. Ils peuvent ainsi provoquer le colmatage des circuits d'arrosage par entartrage..

## CONCENTRATION EN ÉLÉMENTS TOXIQUES

Certains sels peuvent être gênants quand ils se trouvent naturellement en quantités supérieures aux exportations classiques des végétaux.

Le chlore par exemple n'est indispensable à la plante qu'en quantités infinitésimales. Il est rarement utile. Certaines plantes sont tolérantes au chlore comme la betterave à sucre, la tomate, l'orge, l'épinard. Par contre d'autres plantes sont sensibles à sa présence comme la plupart des arbres fruitiers ; le tabac, la pomme de terre, la laitue les haricots.

Globalement pour la plupart des espèces la teneur des chlorures dans l'eau ne doit pas dépasser 250 mg/l. Elle devra être inférieure à 35 mg/l pour des plantes sensibles telles que le tabac, les fougères, les azalées…

## PILOTAGE DÉLICAT DE L'IRRIGATION

Plus encore qu'avec des eaux douces, la gestion de l'irrigation avec des eaux salées devra tenir compte des caractéristiques du milieu. Si l'évaporation est importante, il faut éviter un trop faible apport en eau, car celle-ci serait évaporée avant d'avoir pu irriguer complètement les plantes et le sol : les sels dissous s'accumuleraient dans les premiers horizons.

A l'inverse, dans les situations où l'eau s'infiltre lentement et s'accumule en profondeur, on peut observer une remontée des eaux souterraines par capillarité. Cette action capillaire ramène vers la surface les sels dissous situés en profondeur. Un phénomène comparable peut être observé avec les remontées de nappes souterraines d'eau saumâtre. Les apports en eau pour l'irrigation doivent donc être calculés en fonction des taux d'évaporation, de la proximité et de la qualité des eaux souterraines, et de la teneur en sels du sol et de l'eau.

**L'analyse de l'eau est un préalable utile pour savoir si elle est adaptée à un usage en irrigation.**

***(1) SAR = Na / √((Ca + Mg)/2) les éléments étant exprimés dans la même unité (meq/L en général)***

# SUBTILE ET CAPRICIEUSE : LA TRUFFE

*Publié le 1 septembre 2011*

Capricieuse la truffe ? Certes elle sait se faire attendre… Pour autant, elle n'apparaît jamais au hasard : au LCA, depuis plus de 20 ans, nous réalisons des analyses de terre afin de quantifier le potentiel écologique d'un sol pour la production de ce champignon spécifique, bien connu des gastronomes.

En effet, de même qu'en viticulture les analyses de terre permettent de déterminer, en association avec d'autres facteurs le porte greffe le plus adapté à une parcelle, elles permettent également de diagnostiquer le potentiel truffier d'un sol, de dire si la truffe peut y fructifier, et plus précisément quelle espèce de truffe est adaptée.

Il est important de noter que les méthodes utilisées sont spécifiques pour certaines et qu'une bonne interprétation des résultats est essentielle.
La truffe est un champignon hypogé (1) , qui accomplit une partie de son cycle en symbiose avec un arbre (chêne, noisetier, pin noir, charme, tilleul, etc..), mais qui devient autonome dès juin.

Il est donc essentiel qu'elle soit alors dans un milieu propice à son développement pour que la truffette puisse s'alimenter et grossir afin d'être cavée (2) entre la fin de l'automne et le milieu de l'hiver.

## FRAGILE ÉQUILIBRE, DIVINE RÉCOMPENSE

Les éléments les plus importants pour que la truffe puisse fructifier et produire cette rabasse (3) si prisée sont les suivants :

> une structure grumeleuse, aérée, facilitant la circulation de l'eau et de l'air ; une structure compacte pourrait conduire à l'asphyxie du champignon et à la pourriture du divin tubercule… Au laboratoire, cette structure est appréciée directement par observation visuelle, ou indirectement à travers des résultats analytiques tels que la texture (teneurs en argiles, limons et sables), les teneurs en calcaire, matière organique et le C/N,

> une teneur en calcaire au moins égale à 1%, et un pH de l'ordre de 7,9 idéalement, mais au moins égal à 7,4 ; en effet Tuber Melanosporum (4) et Tuber Uncinatum (5) sont inféodés aux sols calcaires pour fructifier,

> une matière organique :

- en quantité suffisante, l'idéal étant une teneur supérieure à 2%, et adaptée à l'espèce de truffe en terme de qualité, appréciée par le C/N, l'idéal étant entre 9 et 11 pour la truffe du Périgord et entre 7 et 15 pour la truffe de Bourgogne.

D'autres éléments jouent également un rôle important et sont souvent négligés à tort (phosphore, potassium, magnésium, capacité de rétention en eau, etc..).

Comme souvent en écologie, ces éléments doivent être appréhendés dans leur globalité pour porter un diagnostic, et non isolément. Dans certains cas il est possible de remédier à une caractéristique défectueuse, et dans d'autres cas il faut modifier le projet pour s'orienter vers une autre espèce de truffe, un autre champignon, ou une autre production.

D'autres facteurs écologiques sont également importants : orientation de la parcelle, climat (pluviométrie, température), passé cultural, entretien de la plantation, etc... Rien ne doit être négligé.

Il faut préciser que contrairement à beaucoup d'autres cultures, la trufficulture n'a pas de résultat garanti ; au-delà du délai de carence habituel de 3 à 10 ans avant la première récolte, il arrive que la première truffe se fasse attendre … indéfiniment. C'est pourquoi l'on parle encore du « miracle du diamant noir ».

Pour mettre toutes les chances de son côté, une analyse de terre est un outil précieux en trufficulture.

Le référentiel utilisé par LCA a été établi par l'INRA (INRA de Bordeaux et de Clermont Ferrand). Il fait autorité dans le monde trufficole, et le LCA reçoit des échantillons de terre de toute la France, mais aussi de beaucoup d'autres régions du Monde (Amériques, Océanie, Europe de l'Est, Asie, Afrique).

Le début de l'automne est la bonne période pour réaliser ces analyses. N'hésitez pas à nous contacter !

Une truffière en Périgord

*Lexique*

*(1) Hypogé : Se dit des végétaux ou organes végétaux qui restent en permanence sous la surface du sol (cotylédons de nombreuses espèces, truffes, etc.). Dictionnaire Larousse*
*(2) Caver : action de rechercher les truffes. Vient du nom d'un instrument, le « cavadou », servant à déterrer les truffes.*
*(3) Rabasse : désigne la truffe en Provençal*
*(4) Tuber Melanosporum : dite du Périgord, du Tricastin, de Norcia, ou Rabasse en Provençal.*
*(5) Tuber Uncinatum : dite truffe de Bourgogne de Champagne, truffe grise ou truffe de Haute-Marne*

# L'EN-VERT DU DÉCOR

*Publié le 15 septembre 2011*

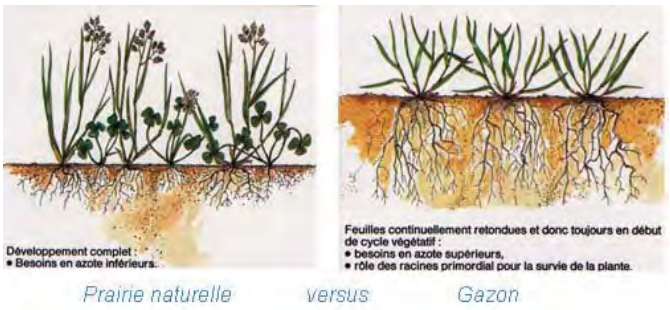
Qu'y a-t-il de commun entre un parterre de fleurs sur un rond-point urbain, et le Stade de France ?
Ce sont des espaces verts ! On comprend tout de suite la grande diversité qu'il peut y avoir, tant en terme d'espèces cultivées, que de conduite pour ces terrains aux usages différents.

**On distingue quatre grands types d'espaces verts :**

- des terrains engazonnés, ou plantés d'arbres et/ou d'arbustes, conduits de manière extensive, et se rapprochant un peu des prairies ou des forêts (rough, parc et jardin, plaine de jeux, …)
- des terrains engazonnés conduits de manière plus intensive (fairway, terrain de sport honneur et entraînement, hippodrome, …)
- des terrains engazonnés, de peu à totalement artificialisés (green et départ de golf, terrains de sports intensifs, …)
- des espaces plantés de fleurs, d'arbustes et d'arbres

Selon l'utilisation de l'espace, les attentes seront très différentes : on n'aura pas les mêmes exigences en matière de couleur ou de qualité de surface pour un stade, un green de golf ou une pelouse devant un supermarché.

Une attention particulière doit être apportée au moment de la création de ces espaces. Des précautions sont à prendre, en lien avec les contraintes spécifiques liées à leur exploitation : une fois en place, il est en effet difficile d'intervenir pour retourner un green ou un terrain de sport à cause d'un problème d'asphyxie, qui aurait pu être géré lors de la mise en place avec une bonne connaissance du sol.


Développement complet :
• Besoins en azote inférieurs.
Feuilles continuellement retondues et donc toujours en début de cycle végétatif :
• besoins en azote supérieurs,
• rôle des racines primordial pour la survie de la plante.

*Prairie naturelle versus Gazon*

Par la suite, le mode de gestion intensif de ces espaces a des conséquences sur leur développement racinaire et leur sensibilité aux différents stress.

En fonction du niveau d'artificialisation et d'intensification, les pratiques de fertilisation selon adaptées.

Même s'il existe des engrais « techniques » (azote retard, libération contrôlée dans le temps des éléments, …) pour ces espaces, la gestion de la fertilisation reste délicate, d'autant plus que le terrain est artificialisé. On peut également utiliser une fertilisation à base d'amendements organiques pour satisfaire les attentes des utilisateurs.

Il faut également prendre en compte l'irrigation qui va souvent de pair avec une pelouse verte toute l'année. Le positionnement et le fractionnement de l'apport azoté est capital et doit être raisonné à partir de la dynamique de l'azote dans le sol. Sur les pelouses irriguées, compte-tenu des tontes et du maintien de conditions favorables à la minéralisation dans le sol, cette gestion est particulièrement délicate.

FERTILISATION = BESOINS DES FEUILLES + BESOINS DES RACINES - AZOTE FOURNI PAR LE SOL
BESOINS DES FEUILLES
AZOTE FOURNI PAR LE SOL
J F M A M J J A S O N D

*Dynamique de l'azote sous gazon*

Tous ces végétaux, développés sur des substrats, nécessitent donc un suivi régulier. En fonction des besoins et des problèmes rencontrés, on pourra s'appuyer sur différents outils disponibles au laboratoire :

- analyse physique : à la mise en place, ou lors de la reprise en entretien d'un espace, pour vérifier l'adaptation du terrain aux contraintes hydriques notamment ;
- analyses chimiques : le statut acido-basique permet de vérifier que le pH est adapté aux espèces en place ou envisagées ; l'analyse des éléments assimilables et échangeables (phosphore, potassium, magnésium) permet d'établir un plan de fertilisation ; l'analyse des oligo-éléments permet d'identifier des risques de carence, particulièrement en sol calcaire ;
- analyses de conformité : vérifier que sa terre végétale est conforme à la norme NF U44-551 ;
- analyses biologiques : toute une gamme d'analyses permet de mieux comprendre le fonctionnement de son sol, du fractionnement de la matière organique, à la cinétique de minéralisation carbone et azote, en passant par la mesure de biomasse microbienne et le dosage de leur activité hydrolitique Lire article sur la biomasse
- analyses d'eau : vérifier que son eau est adaptée à l'irrigation (notamment en terme de salinité) ;
- analyses de végétaux : suivi de croissance, identification d'accidents de végétation, phytodiagnostic

***Note / Remarque :*** LCA propose une gamme complète d'analyses pour vos espaces verts et ses agronomes sont à votre disposition pour réaliser des interprétations et des conseils.

# TOUT A UNE FIN, SAUF LA BANANE QUI EN A DEUX

*Publié le 20 mars 2014*

La curiosité étant nécessaire à la connaissance (A. Maurois), cette note initie une nouvelle série d'Agro Reporter sur des cultures non européennes dans l'idée de regarder ce qu'elles peuvent nous apprendre sur les espèces cultivées en France. Commencer par le bananier s'impose tant cette plante fait partie du patrimoine collectif. Ses particularités physiologiques et agronomiques expliquent son importance économique, sociologique et politique.

## Parce que le bananier n'est pas un arbre

*Musa x paradisiaca*

Présent dans toutes les zones intertropicales humides, le bananier est une monocotylédone herbacée de la famille des Musacées. Malgré sa hauteur potentielle (jusqu'à 8 mètres de haut) le bananier n'est donc pas un arbre. Des feuilles de dimension croissante démarrent d'un rhizome avec des pétioles qui s'imbriquent progressivement les uns dans les autres pour former un pseudo tronc, non ligneux. Quand le nombre de feuilles est suffisant, une tige, souterraine au départ, se développe à l'intérieur de ce faux tronc et forme une inflorescence au centre des feuilles qui va former le futur régime. Un cycle complet (phase végétative, floraison, fructification) dure de 9 à 14 mois. Après la récolte, on coupe le pseudo tronc pour favoriser la nutrition des rejets apparaissant à la base. C'est sur un de ces rejets, préalablement choisi (oeilletonnage), que se fera la production du cycle suivant. Le bananier est donc une plante pérenne avec une production non saisonnière.

Cette capacité de reproduction végétative explique la facilité de culture de la banane, mais aussi les risques de propagation de maladies et parasites et d'appauvrissement génétique. L'utilisation de vitro-plants a été un progrès important pour cette espèce. Cette capacité végétative exceptionnelle explique également des besoins particulièrement élevés en eau et en éléments minéraux.

| | kg / ha |
|---|---|
| AZOTE | 350 à 400 |
| P2O5 | 90 à 130 |
| K2O | 1500 à 2000 |
| CaO | 300 à 350 |
| MgO | 190 à 220 |

*Immobilisations par une bananeraie à 50 t/ha (d'après Lahav et Marchal)*

## Parce que la banane supporte le transport

La banane est un fruit climactérique, c'est-à-dire capable de mûrir après cueillette. Cette capacité d'autonomie s'acquiert sur la plante et la récolte peut se faire avant maturité gustative, mais seulement quand le fruit a acquis la compétence à mûrir. Les fruits sont classés en fruits climactériques (pommes, kiwis hayward, poires, tomates…) et non climactériques (agrumes, raisin, fraise…), c'est-à-dire peu ou pas sensibles à l'éthylène. Un fruit non climactérique est récolté en fonction de ses qualités gustatives et entrera, dès la cueillette en phase de sénescence. Même si cette classification trop simpliste est remise en question (certaines variétés de la même espèce, comme pour le melon ou l'actinidia, pouvant être ou non climactérique selon leur génotype), elle a le mérite d'expliquer le développement commercial de la banane : sa nature climactérique lui permet de supporter le transport (récolte en vert) et la conservation, moyennant un contrôle des conditions d'ambiance (O2, CO2). A l'inverse, le processus de maturation peut être activé en diffusant de l'éthylène dans la chambre de conservation (mûrisserie). Sa peau confère également à la banane une résistance mécanique importante (aux chocs et meurtrissures) qui explique également sa facilité de transport.

Par contre, la peau (non consommée) représentant une part significative du poids du fruit, la banane présente, par rapport aux autres fruits, un des plus mauvais rapports TA / TC (Total Acheté / Total Consommé).

## Parce que c'est un des fruits les plus consommés dans le monde

*Plantation de bananiers au Burundi*

Selon les sources, les bananes sont la troisième ou la quatrième denrée alimentaire de base dans le monde. En fait, il faut distinguer trois types de bananes :

- **La Banane dessert** : la plus cultivée, c'est elle qui fait l'objet des échanges commerciaux. Il existe plusieurs centaines de variétés mais une seule (Cavendish) représente la quasi-totalité des échanges. Cette « monoculture » apparaît d'autant plus inquiétante que dans les années 1940 la variété Gros Michel a été entièrement détruite par la maladie de Panama (fusariose du bananier) alors qu'elle était aussi très majoritaire et qu'une variante de ce champignon (Fusarium oxysporum), résistant à tout fongicide, commence à infecter la Cavendish.
- **La Banane à cuire (**25% de la production mondiale de bananes) : là aussi, il existe plusieurs centaines de variétés très souvent locales se distinguant des bananes dessert par leur moindre richesse en sucres. Les principales représentantes sont les Banane plantain.
- **la Banane à bière :** on la trouve surtout dans la région des Grands Lacs en Afrique et elle se caractérise par son amertume.

Le commerce international de la banane représente moins de 15% de la production et se caractérise par une très forte concentration des opérateurs (3 sociétés représentant près de 60% du commerce mondial). A l'échelle mondiale, la banane est donc un fruit à consommation locale avec une grande importance stratégique pour les problèmes de nutrition en pays tropicaux et cela d'autant plus que ce fruit présente de fortes qualités nutritionnelles.

## Parce que c'est un des fruits les plus riches

Même s'il faut moduler les résultats du tableau ci-dessous (exprimés sur le frais) par la forte teneur en matière sèche de la banane, ce fruit est un des plus énergétiques que l'on puisse consommer.

| Composition pour 100 g ingérés | | BANANE | POMME | KIWI |
|---|---|---|---|---|
| Energie | kilojoules | 397 | 180 | 243 |
| Protéines | g | 1.2 | 0.1 | 1.1 |
| Glucides | g | 20.5 | 10.0 | 9.37 |
| Lipides | g | 0,2 | 0.1 | 0,7 |
| Eau | g | 74.7 | 88.4 | 84.1 |
| Magnésium | mg | 32.8 | 4,0 | 12.2 |
| Phosphore | mg | 17.5 | 6,4 | 47.1 |
| Potassium | mg | 411 | 97 | 270 |
| Calcium | mg | 4,50 | 20.4 | 26.6 |
| Manganèse | mg | 0.63 | 0.1 | 0,07 |

*Composition de 3 fruits climactériques (source table Ciqual 2012)*

***Ainsi, les facultés végétatives du bananier et sa facilité de reproduction, la non saisonnalité de sa production, mais aussi la richesse alimentaire de la banane et sa facilité de transport expliquent l'importance de la culture de cette espèce. Le Service Agronomie du LCA est à votre disposition pour toute information complémentaire.***

# VIGNE ET VIN

L'AGRO reporter

EDITION COMPLETE

# LE VIN EST LA RÉPONSE DE LA TERRE AU SOLEIL *(MARGARET FULLER)*

*Publié le 20 janvier 2011*

La viticulture de ce début de 21ème siècle doit relever plusieurs défis :

- poursuivre l'amélioration de la qualité des vins,
- répondre aux préoccupation environnementales exprimées par la société,
- préserver la pérennité de ses outils de production : la vigne et le terroir.

Un grand nombre de facteurs se combinent pour donner aux vins leur caractère : cépage, climat, choix techniques du viticulteur. Parmi ceux-ci, la gestion de la matière organique des sols, la fumure azotée, la technique d'entretien du sol (enherbement ou pas, travail du sol…) peuvent influencer non seulement le comportement de la vigne, mais également la composition des moûts, le déroulement de la fermentation alcoolique, ainsi que la composition et les propriétés organoleptiques des vins… Une mauvaise nutrition du végétal peut être à l'origine de déséquilibres gustatifs : dureté, amertume, manque de corps, baisse d'intensité aromatique, manque de profondeur, de minéralité…

Certains déséquilibres peuvent être corrigés par l'œnologue. Toutefois la production de vins de qualité nécessite de trouver des solutions " à la vigne " afin d'obtenir une matière première, le raisin, qui exprime pleinement les potentialités et les caractéristiques du végétal et du terroir.

## QUID DE LA MATIÈRE ORGANIQUE ?

" Le sol est vivant ! ". La MO constitue le pilier de l'activité biologique du sol, indispensable à sa fertilité. Elle intervient dans le développement des microorganismes responsables, notamment de la mise à disposition de l'azote sous une forme utilisable par la vigne (nitrification).

Or l'azote est un élément essentiel de la fermentation des moûts. Si les œnologues peuvent facilement pallier une carence, ils ne peuvent que modérément corriger les défauts d'une vendange issue d'une vigne trop vigoureuse pouvant parfois manquer de maturité. La MO doit être appréciée par rapport au potentiel de vigueur de la parcelle, en relation avec le couple cépage/porte-greffe.

Des éléments autres que l'azote vont entrer dans la composition de la vendange et donner au vin ses qualités organoleptiques.

***Deux exemples :***

- l'acidité des vins est conditionnée par celle des moûts. Cette acidité dépend elle-même de la neutralisation par le potassium des acides organiques présents dans la baie de raisin, et dans une moindre mesure par le calcium et le magnésium,

- la réduction de l'apport d'eau en phase de véraison et de maturation de la baie favorisent aussi l'accumulation des sucres et le développement des arômes.

Là aussi, les matières organiques du sol ont un rôle à jouer.

En contribuant au développement de la rhizosphère, les matières organiques stimulent des échanges minéraux entre les radicelles de la vigne et l'eau du sol. Elles sont également très impliquées dans la régulation hydrique de la parcelle et soulagent la vigne pendant les épisodes estivaux très secs.
Outre ces effets sur le métabolisme du végétal, les chercheurs s'intéressent depuis quelques années à la relation entre la matière organique et la dynamique du cuivre dans les sols viticoles. Leurs travaux montrent que la matière organique semble modifier les mécanismes de transfert du cuivre dans le sol en raison de la forte affinité de cet élément pour les matières organiques. La biodisponibilité du cuivre et son impact sur l'environnement s'en trouveraient modifiés.

Si, faire un bon vin c'est avant tout produire un raisin de qualité, il est certain que la matière organique intervient dans l'expression des potentialités du terroir. Mais les interactions entre association cépage/porte-greffe, climat, sol, techniques d'entretien du sol, etc … sont délicates à interpréter et nécessitent des analyses et l'expérience de spécialistes des sols, de la nutrition et de la vigne.

Améliorer la qualité du raisin ne signifie pas " standardiser le vin " ; le terroir, le matériel végétal et le savoir faire des hommes de la vigne et du vin joueront toujours un rôle essentiel afin d'offrir au dégustateur une panoplie infinie de saveurs.

# GROS PLAN SUR LE PRÉLÈVEMENT EN VIGNE

*Publié le 24 juin 2011*

A l'image d'une photographie, l'analyse révèle l'état du « sujet », échantillon de terre ou organe végétal, au moment où il a été prélevé. Pratiquement, un résultat d'analyse ne reflète donc que le prélèvement.
Comment passer de l'échelle de la parcelle (4 500 000 kg / ha sur l'horizon 0-30 cm), à un échantillon de terre de 500 grammes envoyé au laboratoire… Au-delà du prélèvement, le résultat d'analyse doit être le reflet exact de la parcelle. On mesure bien toute la difficulté de l'entreprise qui repose évidemment sur un échantillonnage de qualité. La méthodologie du prélèvement doit donc être rigoureusement respectée et s'adapter à la nature de l'échantillon comme à la variabilité spatiale dans la parcelle (hétérogénéité du sol, effets de bordure, rang / inter-rang des cultures pérennes, …). Rappelons quelques principes de base pour réussir cette étape fondamentale de l'analyse.

## ZOOM SUR LA VIGNE

Les diverses analyses effectuées dans le cadre du suivi des vignobles illustrent bien les différentes approches possibles de l'analyse et par conséquent du prélèvement. Ces approches complémentaires répondent à des attentes bien identifiées :
> analyse de la terre : pour évaluer le potentiel du sol et connaître la quantité des éléments minéraux présents ;
> analyses foliaires ou pétiolaires, analyses de baies, ou analyses de sarments pour apprécier la réponse du végétal aux conditions édaphiques.

## PRÉLÈVEMENTS DE TERRE

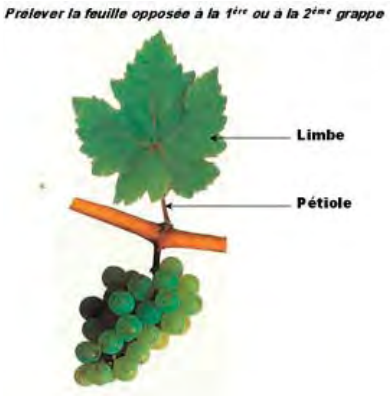
On attend d'une analyse de terre qu'elle permette d'évaluer le potentiel minéral et organique de la parcelle, et qu'elle mette en évidence les différentes contraintes de fonctionnement racinaire.
Les prélèvements se font à l'aide d'une tarière manuelle de type « Edelmann » ou à l'aide d'une bêche (pour l'horizon 0-30 cm).
Il est dangereux de prétendre obtenir un prélèvement représentatif en arpentant toute la parcelle et en réalisant les prélèvements élémentaires de manière aléatoire. Une petite zone calcaire peut complètement fausser l'analyse, qui n'est plus reproductible dans le temps. Et le palissage rend la circulation dans la parcelle difficile. Depuis plus de 10 ans, on privilégie le prélèvement sur une zone la plus homogène possible, avec repérage GPS ou graphique (plan) : l'analyse est représentative de cette zone, et le suivi dans le temps devient possible. Ces informations sont à conserver précieusement.
La stratégie de prélèvement va être différente si la vigne est déjà en place ou si, au contraire, il s'agit d'une analyse en vue d'une plantation.

***> Vigne en place :***
la zone de prélèvement ayant été choisie, le plus souvent à un endroit représentatif de la parcelle, on sélectionne 4 rangs distants d'environ 5 mètres. On réalise ensuite 4 prélèvements sur chacun de ces rangs, tous les 5 mètres, sur le cavaillon. Le premier centimètre est supprimé avec la couverture herbeuse. La profondeur standard du prélèvement est de 30 cm. Les différents sondages sont mélangés pour constituer l'échantillon final de 400 à 800 grammes.

***> Future plantation :***
la méthodologie de prélèvement est, dans ce cas, identique à celle utilisée pour les prélèvements en grande culture. Sur un certain nombre de terroirs, il est important de compléter l'analyse de sol par une analyse de sous-sol, correspondant à l'horizon 30-60cm (à moduler en fonction de la profondeur du sol utile). Les informations données par l'analyse du sous-sol, comme la détermination de l'Indice du Pouvoir Chlorosant (IPC), sont fondamentales dans le choix du porte-greffe.

Le prélèvement de sol sera toujours mieux valorisé s'il est effectué conjointement à un profil cultural ou pédologique qui donnera des renseignements précieux sur la structure, l'aération, les zones de tassement non décelables sur l'analyse de terre. La réalisation d'un profil devient particulièrement recommandée s'il s'agit d'une analyse pour plantation.

## PRÉLÈVEMENTS FOLIAIRES




Ici l'objectif est d'apprécier l'état nutritionnel de la plante à un stade donné, dans le contexte pédo-climatique de l'année.

- A l'échelle de la parcelle, on choisira 6 à 10 rangs dans une zone homogène et représentative du comportement général de la parcelle (dans la même zone que l'échantillon de terre) en indiquant les coordonnées GPS ou en repérant cette zone sur un plan de localisation.
- Le prélèvement se fera sur 5 souches minimum par rang et la feuille récoltée doit être celle qui se trouve à l'opposé d'une grappe (grappe inférieure).
- L'échantillon global devra être constitué de 30 à 50 feuilles entières (limbe + pétiole), à partir de souches d'un même assemblage cépage – porte-greffe.

Conventionnellement, les échantillons sont récoltés à deux grands stades physiologiques de la vigne :
- Fin floraison - début nouaison (chute des capuchons floraux) pour anticiper d'éventuels carences ou déséquilibres
- A la véraison (repérable par le changement de couleur des baies) jusqu'à la récolte, période la plus utilisée pour caractériser l'état nutritionnel.

Il est possible également d'effectuer des suivis. Ceux-ci comportent en général trois prélèvements par an (floraison, véraison et maturité) pour apprécier les dynamiques de nutrition.

De même, il est parfois utile d'effectuer un prélèvement en dehors des stades décrits ci dessus, en cas de problème particulier. L'interprétation des résultats étant alors basée sur une approche comparative, il est alors utile de joindre un lot « sain » au lot « à problème ».

## PRÉLÈVEMENTS DE PÉTIOLES

L'analyse de pétioles permet d'apprécier la réponse du végétal aux conditions pédo-climatiques en ciblant les équilibres cationiques (calcium, magnésium, potassium). L'échantillon global sera composé de 50 à 100 pétioles, en veillant à constituer toujours l'échantillon à partir de souches d'un même assemblage cépage – porte-greffe.

Les périodes de prélèvement sont les mêmes que pour les analyses de feuilles.

A l'échelle de la parcelle, il faut choisir 8 rangs dans une zone homogène (toujours dans la même zone que l'échantillon de terre) et prélever sur 6 souches par rang, choisies au hasard, pour avoir un échantillon représentatif.

p.55 […]

[...]
Comme pour les foliaires, il faut prélever la feuille à l'opposé d'une grappe et surtout séparer immédiatement le pétiole du limbe afin d'éviter des migrations, entre pétiole et limbe, qui modifieraient les teneurs du pétiole et donc fausseraient les résultats. L'analyse pétiolaire est très fréquemment employée au stade mi-véraison.

## PRÉLÈVEMENTS DE BAIES

En fonction de la période du prélèvement, l'analyse de baies répond des objectifs distincts :

- apprécier la composition minérale des baies (prélèvement de début d'été) ;
- apprécier la qualité de la vendange (prélèvement tardif) et la maturité.

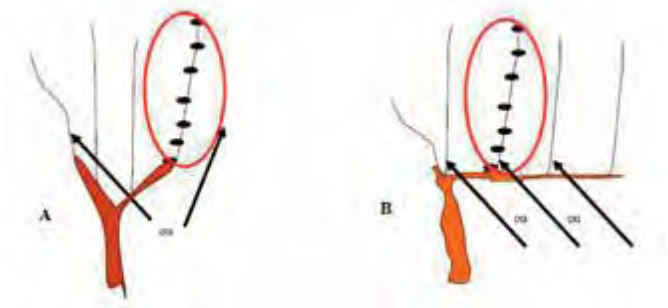
Les laboratoires d'agronomie sont surtout concernés par les prélèvements précoces. La méthodologie de prélèvement est proche de celle des feuilles mais l'échantillon est constitué de grappillons de 3 à 10 baies.

## PRÉLÈVEMENTS DE SARMENTS

L'analyse de sarments est utile pour apprécier la qualité de mise en réserve minérale et organique.

Le prélèvement de sarments se fait en période de repos hivernal et consiste à prélever 30 portions de sarments sur 30 souches différentes par parcelle homogène non taillée en choisissant des rameaux fructifères et aoûtés.

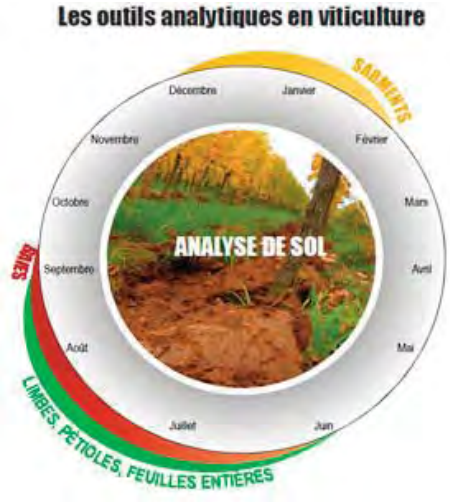
Il faut prendre uniquement les 6 premiers entre-nœuds de la base, sur le second rameau du courson pour une taille courte (schéma A) ou sur l'un des trois premiers rameaux de la latte pour une taille longue (schéma B).




## PRÉLÈVEMENTS DE PLANTES MALADES

L'analyse peut permettre de diagnostiquer ou de confirmer des atteintes parasitaires. Dans ce type d'approche, et lorsque cela est matériellement possible, il est préférable de prélever des plantes entières.

- Au stade véraison pour la vigne, mais ce stade peut être, sans incidence notable, légèrement dépassé ;
- Faire parvenir au laboratoire des plantes malades (3 à 5 plantes présentant différents stades d'évolution), et des plantes saines (2 à 3 plantes) ;
- Pour une plante entière, éliminer la terre des racines par agitation (ne pas laver la plante) ;
- Pour certaines analyses (contrôles virologiques par exemple), il est possible de prélever des organes ou fragments d'organes (feuilles, tiges, racines).




## APPROCHE GLOBALE POUR LE SUIVI NUTRITIONNEL

Pour apprécier la nutrition de la vigne en terme de dynamique, il convient de s'appuyer sur les différents outils analytiques à notre disposition.

L'analyse de sol est indispensable pour interpréter les analyses de végétaux et reste donc à la base du raisonnement. Dans le cadre du suivi particulier d'une parcelle ou d'une étude approfondie, il est intéressant d'effectuer plusieurs prélèvements sur la même année pour mieux comprendre la réponse du végétal sur les différents stades physiologiques. On peut effectuer un suivi foliaire ou pétiolaire (voir ci dessus) ou introduire les analyses de baies et de sarments selon l'objectif : par exemple : analyse foliaire fin floraison (pour apprécier l'état végétatif), analyse de baie mi juillet (pour apprécier la production) et analyse de sarments en début d'hiver (pour apprécier la mise en réserve et la préparation de l'année suivante).

Quel que soit le type d'analyse, pour une interprétation adaptée aux objectifs et aux attentes, il est essentiel également de bien remplir la fiche de renseignements. Le laboratoire aura besoin notamment de connaître la date de prélèvement, la proportion de refus (cailloux) pour les analyses de sol ou l'état végétatif et les objectifs de production pour les analyses végétales, afin de fournir un conseil adapté.

*tous les protocoles détaillés sont disponibles dans notre Guide des Prélèvements, téléchargeable sur notre site*

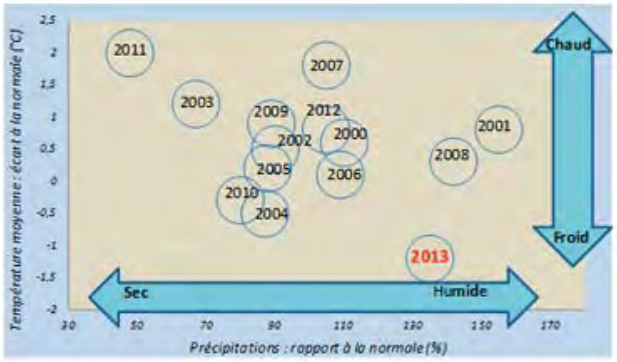
*Les conditions de conditionnement et de transport peuvent être spécifiques pour certaines analyses, n'hésitez pas à nous contacter !*

# MILLESIME 2013 : FAITS D'HIVER ET DE PRINTEMPS

*Publié le 12 decembre 2013*

Dans sa définition stricte, « le 'terroir' vitivinicole est un concept qui se réfère à un espace sur lequel se développe un savoir collectif, des interactions entre un milieu physique et biologique identifiable et les pratiques vitivinicoles appliquées, qui confèrent des caractéristiques distinctives aux produits originaires de cet espace » (OIV, 2010). En ce sens, le facteur climatique est indissociable de la notion de terroir. Le climat a souvent été évoqué dans les précédents Agro Reporter pour l'influence qu'il exerce sur le fonctionnement du sol et des plantes. L'année 2013 se caractérise par un très fort contraste des conditions météorologiques d'une saison à l'autre mais également par une homogénéité climatique peu habituelle entre les différentes régions françaises. Cet Agro Reporter présente une synthèse de ces conditions climatiques (sources Météo France) et de leurs effets sur les vignes.

**• PRINTEMPS** (Mars à Mai) : le printemps a été froid, humide et peu ensoleillé sur la totalité des régions françaises, faisant de 2013 une année exceptionnelle (printemps le plus froid depuis 1987). Toutes les régions viticoles ont subi ces difficultés climatiques. Par exemple : précipitations une fois et demie supérieures à la normale (1981-2010) dans le sud de la Champagne ou dans le sud de l'Aquitaine ; 351 heures d'ensoleillement à Dijon pour une normale de 549 heures (1991-2010) ; 159 mm de pluie en mars à Nîmes pour une normale de 40 mm.

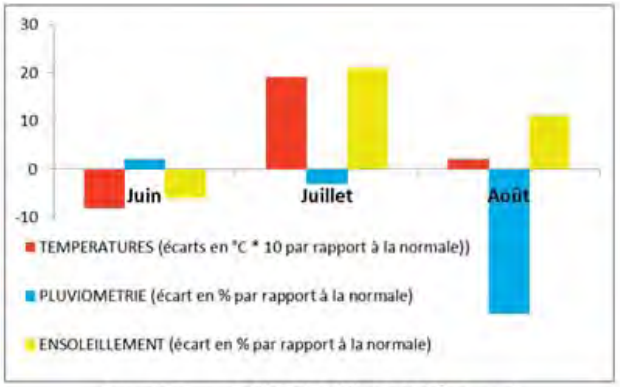



*Températures et précipitations au printemps de 2000 à 2013 (source Météo France)*

> **Conséquences sur les ceps** : pour toutes les régions viticoles, ce printemps difficile s'est traduit par des retards de débourrement, de développement et de floraison et, de façon quasi généralisée, par un jaunissement des vignes. Ce phénomène traduisait un épuisement des réserves glucidiques et minérales des ceps alors que le système racinaire n'était pas encore suffisamment actif (sols froids, humides, conditions peu poussantes...). Ces symptômes ont été accentués sur les parcelles chlorosantes ou sur les vignes ayant eu des difficultés de mise en réserve à fin 2012.

**• ETE (Juin à Août) :** après un mois de juin proche des mauvaises conditions du printemps, dans l'ouest et le sud-ouest, mais conforme aux références dans le nord-est et Rhône-Alpes, l'été a été généreux sur toute la France avec le mois de juillet le plus ensoleillé depuis 1991 et un ensoleillement de 10 à 20 % supérieur aux normales en Août.
Malheureusement de fréquents accidents climatiques ont pénalisé le vignoble : fortes crues dans le sud-ouest, tornades, orages et surtout grêle sur la quasi-totalité des régions (Val de Loire, Bourgogne, Bordelais...). Les dégâts ont souvent été dramatiques et, cumulés aux difficultés du printemps, devraient conduire à une récolte nationale de vin inférieure à la moyenne des cinq dernières années.

> **Conséquences sur les ceps** : en début d'été, les analyses de végétaux traduisaient l'état très juvénile des organes (limbes, pétioles) en présentant des teneurs encore très réduites en calcium (et éventuellement magnésium) par rapport à l'azote. Le rapport azote / calcium diminue en effet considérablement au fur et à mesure du vieillissement foliaire. (Pour plus d'information, voir l'AgroReporter «Prends garde à la couleur des feuilles»).




*Caractéristiques de l'été 2013 (d'après Météo France)*

Ce phénomène a entrainé des conséquences importantes : retards de maturité, forte sensibilité aux parasites de ces organes encore tendres, concurrence entre la partie végétative et la partie fructifère, coulure et millerandage sur les cépages sensibles...
Pendant la deuxième partie de l'été, malgré la vague de chaleur de fin juillet, les vignes ont montré une activité photosynthétique intense qui a permis de compenser une partie du retard végétatif tout en assurant un niveau d'accumulation cohérent dans les baies.

**• AUTOMNE (Septembre à Novembre) :** alors que le mois de septembre a été proche des normales saisonnières, mais avec quelques disparités régionales (pluviométrie excédentaire en Champagne par exemple), le mois d'octobre a été très doux et humide avec des températures moyennes supérieures de 1,6°C aux normales et des précipitations supérieures de 10%. Après avoir été plus élevées que la normale dans la première quinzaine de novembre, les températures ont ensuite fortement baissé. Globalement, l'ensoleillement a été déficitaire en novembre et les précipitations supérieures à la normale de 30% en moyenne.

> **Conséquences sur les ceps** : le décalage de 10 à 15 jours observé au printemps s'est retrouvé au moment des vendanges. Les vignes ont eu généralement des conditions climatiques correctes en post-vendange, sans chutes de feuilles généralisées ou anticipées, ce qui laisse supposer une possibilité de mise en réserve favorable. Les observations de qualité d'aoûtement vont dans ce sens.

**• HIVER : l'année 2013** restera dans les mémoires pour son climat contrasté : printemps froid et vague de chaleur en été. Il est difficile de savoir, à priori, quelles en ont été les conséquences sur les mises en réserve et sur la qualité du démarrage des vignes en 2014. Les premières analyses de sarments que nous avons réalisées au laboratoire montrent une très forte hétérogénéité des niveaux des réserves minérales et glucidiques qui ne permet pas, pour l'instant, de déterminer une tendance particulière.

***L'année 2013 illustre parfaitement le fait que, pour une plante pérenne, en particulier pour la vigne, la gestion de la nutrition dans le but d'aider la plante à résister à d'éventuels aléas climatiques apparaît certainement plus importante qu'une fertilisation « de besoins » ou de « consommation ». En ce sens, les pratiques favorisant les deux périodes de mise en réserve (été-automne et fin de printemps) apparaissent primordiales, comme l'est également le contrôle de ces réserves.***

# VIE + N = VIN

*Publié le 7 novembre 2013*

L'azote qui, étymologiquement, signifie « sans vie » est pourtant indispensable à tout végétal cultivé et donc aussi à la vigne. Si cette espèce n'est pas très exigeante en azote (prélèvements annuels de 20 à 70 kg/ha pour les feuilles, rameaux et grappes d'une vigne de cuve selon Delas 1989), avec des risques connus, en cas d'excès, pour la qualité de la production, cela ne signifie en rien qu'un manque d'azote ne soit pas pénalisant, au contraire. Face à l'obligation économique d'augmenter les rendements sur la majorité des vignobles, aux difficultés actuelles pour maintenir une acidité suffisante des moûts à l'approche de la vendange (voir l'article de l'Agro Reporter « Coup de moût ») et à des pratiques de nutrition de plus en plus basées sur le fonctionnement du sol et sur des apports organiques, l'azote, et ses moyens de contrôle, reviennent au centre de beaucoup de discussions techniques. Ce premier article rappelle quelques règles de base. Le suivant détaillera les outils analytiques disponibles pour apprécier la disponibilité azotée dans le sol et le végétal.

*< - Vignoble dans l'Aude*

## BESOINS TOTAUX, ET INTENSITE D'ABSORPTION

*« La fumure azotée trouve sa limite dans le fait qu'à partir d'une certaine abondance de la nutrition azotée, on trouve une opposition entre la qualité et le rendement »* (André GROS). Cette opposition explique la mauvaise image de l'azote dans les milieux viticoles, qui se sont longtemps plus souciés de l'aspect technologique que du végétal (l'excès d'azote étant toujours, pour la qualité du produit, plus dangereux et plus difficile à corriger que le manque).

Pareillement, on s'intéresse beaucoup actuellement à la vie du sol et aux apports organiques, avec raison, mais en oubliant parfois la plante que l'on cultive et en ne se donnant pas les moyens de vérifier que les pratiques effectuées sont favorables au végétal. Est-ce que la dynamique de minéralisation du sol, ou des épandages effectués, est en phase avec la cinétique des prélèvements azotés de la vigne ? Est-ce que l'apport organique ne va pas provoquer une « faim d'azote » ou un excès instantané ?

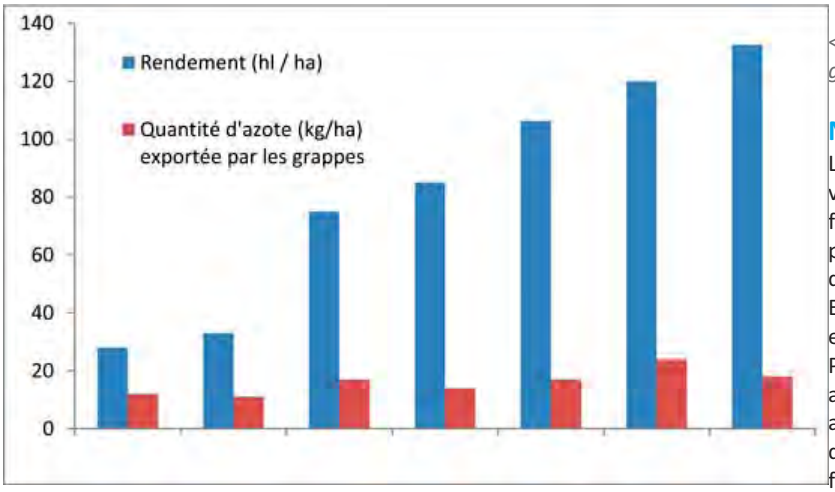
Avec une approche mathématique, les besoins de la vigne sont effectivement faibles et la quasi-totalité des sols peut y subvenir. Par contre d'autres questions doivent être posées. Par exemple, aux périodes critiques précédant la véraison et la maturité, le sol sera-t-il capable de satisfaire une absorption journalière d'azote qui peut atteindre 1kg/ha ? Ou, au démarrage de la végétation, le sol (en lien avec les conditions climatiques) pourra-t-il fournir la dizaine d'unités d'azote nécessaires à une bon relargage des réserves présentes dans le cep ? En plante pérenne, la fertilisation apparaît souvent plus « sécuritaire » qu'ajustée à la couverture des besoins.

*Synthèse des effets de l'azote*

| | * selon le cépage et porte greffe | DEFICIT en AZOTE * | EXCES d'AZOTE * |
|---|---|---|---|
| ETAT VEGETATIF | Démarrage | difficile par manque de réserve | |
| | Développement | faible, feuillage pâle, induction de phénomènes chlorotiques | surface foliaire élevée ; feuillage luxuriant ; maintien de l'humidité autour des baies |
| | Vigueur | faible ; pousses limités en longueur et diamètre | maintien tardif de la croissance au détriment des baies et de la mise en réserve |
| | Chutes des feuilles | précoce | tardive |
| | Aoûtement | irrégulier | imparfait |
| SENSIBILITE | Au parasitisme | augmenté par faiblesse du végétal | fortement augmentée : maladies cryptogamiques (midiou, botrytis, oidium...), pucerons... |
| | Aux aléas climatiqes | élevée | sensibilité aux gels précoces ou tardifs |
| RENDEMENT QUALITE | Coulure | par manque de réserves | par exacerbation de l'axe végétatif |
| | Fertilité | faible | |
| | Maturation | pertes rapides d'acidité et surmaturations | difficile et hétérogène |
| | Qualité des Moûts | fermentation difficile ; concentration des composés (faible volume des baies) ; absence de certains composés (dont précurseurs) aromatiques et de molécules protectrices de l'oxydation (glutathion par exemple) | dilution des composés (volume élevé des baies) ; moindre teneur en sucres |
| | Qualité du Vin | arôme lourd et goût de réduction des vins | moindre couleur et structure ; présence de composés azotés nefastes à la santé ; problème de déviations organoleptiques |

## AZOTE ET RENDEMENT

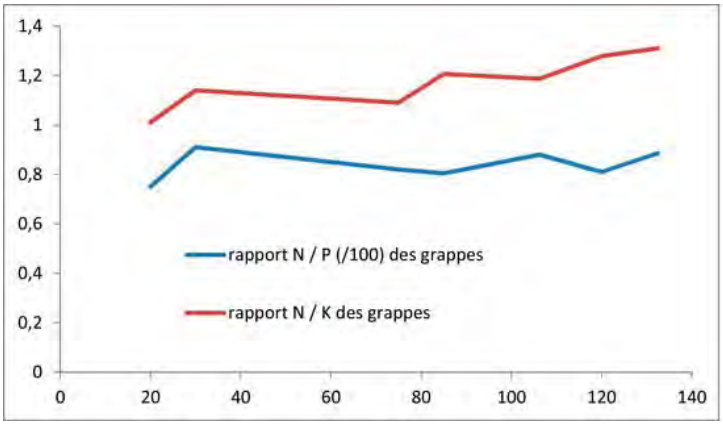
La figure 1 illustre le fait que le volume de vendange influe très peu sur les besoins de la vigne. Contrairement aux plantes annuelles, réfléchir à la fertilisation d'un vignoble en se basant uniquement sur le potentiel de rendement a peu de sens. Le risque de ce type de pratique est notamment de favoriser une sénescence plus précoce des plants, fréquemment observée sur le terrain, et d'augmenter leur sensibilité aux aléas climatiques.
Le même type de risque existe aussi si l'on raisonne mal les différents axes de nutrition (baies, production végétative de l'année et mise en réserve) pour lesquels les périodes de prélèvement ne sont pas les mêmes. La répartition entre ces trois axes est gérée par des équilibres hormonaux, très influencés par le niveau de disponibilité azotée. Des feuilles correctement pourvues en azote ne signifient pas forcement que la mise en réserve sera correcte. De même, les pratiques foliaires d'enrichissement des baies en azote à la véraison sont efficaces pour augmenter la teneur en azote assimilable des moûts et optimiser ainsi la cinétique fermentaire et le profil sensoriel des vins, mais ne constituent pas en soi une nutrition azotée des ceps.




*< - Figure 1 : relation entre rendement et exportation d'azote par les grappes (d'après Champagnol 1984 sur différents cépages et régions)*

## NOTION D'EQUILIBRES

La notion d'équilibre est à la base de la nutrition végétale (comme l'art du viticulteur est d'équilibrer la surface foliaire et le nombre de grappes en fonction des contraintes pédoclimatiques). La vigne ne déroge pas à ce principe avec, par exemple une grande constance des équilibres minéraux dans les grappes, comme l'illustre la figure 2.
En restant dans des pratiques raisonnables, ce n'est pas l'azote en soi qui est dangereux, mais l'azote non équilibré par rapport aux autres éléments. Par exemple, la vigueur d'une vigne est toujours plus pénalisante en sol acide quand le sol manque de calcium. Dès que les objectifs obligent à augmenter la disponibilité azotée, il faut aussi raisonner la disponibilité des autres éléments et les risques d'antagonismes (chimiques, électriques, fonctionnels…).




*< - Figure 2 : équilibre N / P et N / K des grappes pour différents niveaux de rendement (d'après Champagnol 1984 sur plusieurs cépages et régions)*

**La gestion de la nutrition azotée de la vigne apparaît donc comme une opération d'autant plus délicate que la taille sévère rend difficile la visualisation des effets de la fertilisation ou de tel ou tel déséquilibre. Le prochain Agro Reporter appréciera la pertinence des informations apportées par les différents outils analytiques (sol, caractérisation organique, végétal…) comme aide à la décision.**

*La nutrition d'une plante est hydrique, minérale et organique. Les physiologistes s'interrogent encore pour savoir si l'azote fait partie de la nutrition minérale ou de la nutrition organique. Si ces problèmes de classification ont peu d'intérêt en agronomie, où l'approche de la nutrition doit être globale, cela montre bien la place particulière de l'azote. En viticulture, comme le rappelait le précédent Agro Reporter, la gestion de cet élément revêt d'autant plus d'importance que les excès ou déficits de nutrition azotée conduisent rapidement à des problèmes sur la vigne et le vin. Cette deuxième partie fait le point sur les différents outils analytiques mis à disposition de l'utilisateur pour apprécier ou anticiper la nutrition azotée de la vigne.*

## Positionnement des analyses

La plupart des sols sont potentiellement capables, par la minéralisation de la matière organique, d'assumer les besoins azotés réduits de la vigne (voir en exemple la figure 1 qui montre bien la nécessité de confronter le fonctionnement du sol au comportement du végétal). Par contre, les questions à se poser sont : la dynamique de minéralisation de mon sol est-elle en phase avec la cinétique des prélèvements des ceps ? Comment gérer les éventuels apports azotés ?

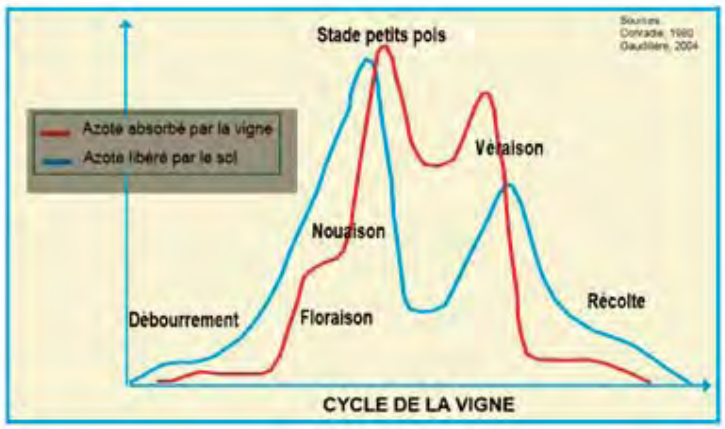



*Figure 1 ->*
*dynamique schématique de nutrition de la vigne et de minéralisation du sol de Jean-Yves CAHUREL IFV*

*(...)*

L'objectif des analyses, qu'elles apprécient le sol ou le végétal, est de répondre à ces deux questions et d'aider à mettre en phase le fonctionnement du sol et les besoins de la vigne en fonction des objectifs de production. En termes de conseil, on peut classer les analyses appréciant l'azote en deux groupes :

- les analyses de constat strict, où l'interprétation se fera en lecture des évènements nutritionnels antérieurs à l'analyse,
- les analyses de potentiel, où l'interprétation permettra aussi d'anticiper des comportements postérieurs à l'analyse en fonction des conditions climatiques et culturales.

Les tableaux 1 et 2 (présentés plus loin) synthétisent ce classement. Cet Agro Reporter, se plaçant du point de vue de l'utilisateur, ne développera pas les méthodes d'analyse : voir à ce sujet le portail Wiki LCA.

## Azote et analyses de sol

Dans les sols, contrairement à tous les autres éléments nutritifs de la vigne, l'azote n'est pas présent dans les roches-mères. Les réserves azotées du sol se trouvent très majoritairement sous forme organique, mises à disposition aux racines des plantes par leur transformation en azote minéral grâce aux micro-organismes. Ainsi, pour un sol moyen à 1,2% de Matières Organiques Totale (M.O.T.) et 3000 t/ha de terre fine, le stock total de M. O. T. est de 36 t/ha. Le stock d'azote organique total est compris entre 1,8 et 2,4 t/ha et le stock d'azote minéral entre 0 et 180 kg/ha (NH4+, NO3-). Cette mise à disposition azotée va être conditionnée et modulée par la nature du sol (granulométrie, pH), par la nature, l'abondance et surtout l'activité de la micro flore et micro faune et, de ce fait, par les conditions de fonctionnement (température, humidité, aération..) et de culture (enherbement, travail du sol, lessivages…). On peut parler ainsi d'un rôle important de l'azote sur « l'effet terroir » (Cornelis van Leeuwen et Philippe Friant, 2011).

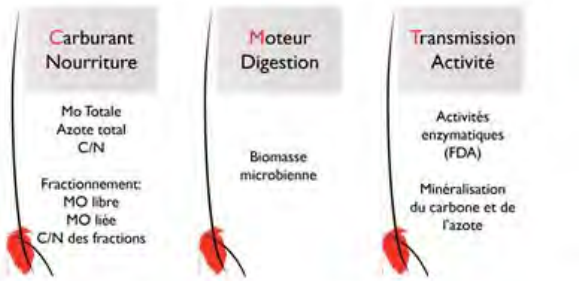



*Figure 2 : répartition des analyses biologiques du sol selon leur objectif (source CELESTA LAB)*

En complément des analyses de sol « classiques » (M.O.T., N Total), le praticien dispose d'un nombre important d'outils analytiques permettant de mieux apprécier le potentiel azoté du sol en relation avec sa biologie : voir figure 2. La seule teneur en matière organique ou en azote total est en effet totalement insuffisante pour anticiper le relargage azoté potentiel. Un sol argileux, très pourvu en matières organiques mais froid au printemps, fournira souvent moins d'azote au démarrage de la vigne qu'un sol sableux peu pourvu en matières organiques, mais se réchauffant facilement. De même, un sol riche en matières organiques, mais peu pourvu en Biomasse Microbienne, fournira peu d'azote. A noter aussi que l'azote du sol ne s'interprète correctement que dans sa relation avec le carbone.

Le tableau 1 présente un classement des différentes analyses de sol en fonction de leur possibilité d'interprétation : constat ou potentiel. D'une façon générale, plus l'analyse « de constat » sera instantanée, plus elle s'interprétera en suivi annuel ou pluriannuel et / ou en confrontation avec des analyses « de potentiel ». Ainsi, en dehors des valeurs extrêmes, en viticulture, le reliquat azoté est difficile à interpréter dans l'absolu. Le suivi du reliquat azoté devient plus intéressant pour comprendre, en lien avec les conditions climatiques, le fonctionnement de son sol surtout si on le compare à la biomasse microbienne, par exemple. De même, le dosage de l'activité enzymatique (FDA) prend tout son sens quand on suit son évolution en parallèle avec les itinéraires culturaux.

| | CONSTAT | POTENTIEL |
|---|---|---|
| MO totale % de sol | * | * |
| N total du sol | * | * |
| MO libre % de la MO totale | * | |
| MO liée % de la MO totale | * | |
| Biomasse Microbienne (BM) | * | * |
| FDA (activité enzymatique) | * | |
| Azote minéralisé en 28 jours | | * |
| Azote minéralisé en 28 jours / MO totale | | * |
| Azote Potentiellement Minéralisable | | * |
| Reliquat Azoté | * | |

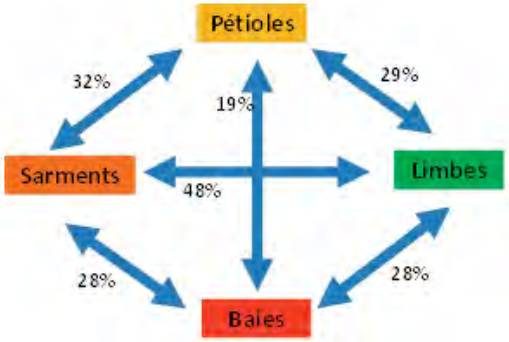
*< - Tableau 1 : classement des analyses de sol en « analyses de constat ou de potentiel »*

## Azote et analyses de végétaux

La nutrition azotée de la vigne doit répondre à trois types de besoins auxquels correspondent trois types d'analyse de végétaux :

-le fonctionnement annuel, apprécié par les analyses de feuilles ou pétioles,
-la production de l'année, appréciée par les analyses de baies,
-la mise en réserve appréciée, par les analyses hivernales de sarments.

On constate en viticulture, de façon parfois surprenante, que, si on excepte les cas extrêmes de déficit ou d'excès, les corrélations entre les teneurs azotées des différents organes sont assez faibles (voir figure 3 où l'on voit que, dans cet exemple, l'azote contenu dans les limbes n'explique que 28% de la variabilité de l'azote des baies). Cela provient du fait que chaque organe prélève l'azote à une période spécifique : des conditions climatiques estivales très sèches peuvent pénaliser l'azote dans les baies et être suivies d'un automne chaud et humide favorisant le relargage azoté par la matière organique du sol et enrichissant ainsi les bois. Cette lecture « climatique » de l'analyse de végétal en fonction de l'organe choisi est indispensable, en lien avec le potentiel de fourniture azotée par le sol.




*<- Figure 3 : exemple de relations statistiques (coefficients de détermination) entre les teneurs en azote des différentes analyses de végétaux (source LCA / ITALPOLLINA ; moyenne sur 3 ans de 25 parcelles du Gers ; analyses foliaires et pétiolaires fin floraison ; analyses de baies courant juillet)*

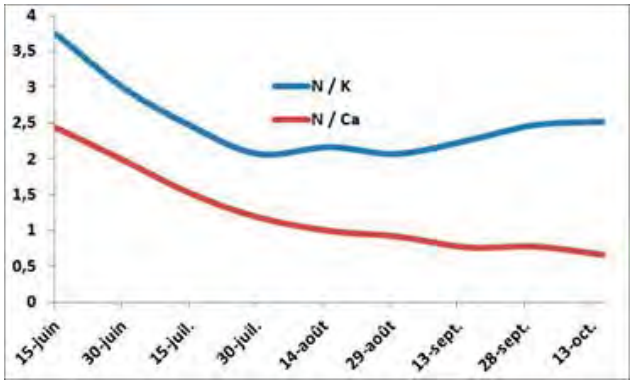
(...)

(...)
Le tableau 2 présente un classement des différentes analyses de végétaux en fonction de leur possibilité d'interprétation pour la nutrition : constat ou potentiel. Comme pour les sols, plus l'analyse « de constat » sera instantanée, plus elle s'interprétera en suivi annuel ou pluriannuel, sauf si l'on dispose (c'est le cas par exemple pour les pétioles dans certaines régions) de références suffisamment nombreuses et spécifiques (terroirs, cépages, porte-greffe…) ou, mieux, de références propres à l'exploitation. Pour les analyses les plus instantanées (analyse de sève), l'interprétation ne peut se faire valablement qu'en termes de suivi.

| | CONSTAT | POTENTIEL |
|---|---|---|
| LIMBES | * | |
| PETIOLES | * | |
| BAIES PRECOCES | * | * |
| BAIES (ou moût) RECOLTE | * | |
| SEVE | * | |
| N-tester | * | |
| Autres analyses au Champ * | * | |
| SARMENTS | * | * |

* (fluorimétrie, chlorophyllométrie... : ces analyses n'étant pas spécifiques à l'azote donnent plutôt une indication de fonctionnement)

*<- Tableau 2 : classement des analyses de végétaux en « analyses de constat ou de potentiel »*




Là aussi, la confrontation entre les différents types d'analyse de végétaux peut avoir un réel intérêt technique. Cornelis van Leeuwen et Philippe Friant (colloque IFV SW 2011) recommandent de croiser plusieurs indicateurs : par exemple azote assimilable du moût à la récolte, teneur en azote du limbe à mi-véraison et mesure de l'indice N-tester à mi-véraison. Le couple « baies précoces » et analyses de sarments permet, lui, d'apprécier la quasi-totalité du cycle nutritionnel avec des possibilités de lecture en termes de potentiel. L'interprétation de l'azote se fera en termes de niveau (concentration), mais surtout en termes d'équilibres avec les autres éléments minéraux. La figure 4 montre un exemple d'évolution du rapport N/K foliaire (baisse progressive jusqu'au début de l'été au fur et à mesure du ralentissement végétatif, stabilisation jusqu'à la vendange pour favoriser la maturation des baies et augmentation en post-récolte pour la mise en réserve). En nutrition, la seule prise en compte de la teneur azotée d'un organe n'est pas suffisante pour comprendre le fonctionnement du végétal.

*< - Figure 4 : évolution des rapports N / K et N / Ca foliaire (d'après Lafon et al. 1965 Ugni Blanc / 41B en Charentes)*

***La nutrition azotée de la vigne restera un sujet complexe du fait de la nature même de la plante pérenne et des liens étroits entre la disponibilité azotée et les conditions édaphiques et climatiques. Par contre, les outils analytiques sont de plus en plus nombreux et pertinents pour aider à la gestion de l'azote au vignoble, si on les utilise à bon escient, c'est-à-dire en connaissant bien leurs intérêts et limites et en les confrontant avec l'observation de la vigne et ses résultats techniques et économiques. Une vision globale, du sol à la baie en passant par la plante, est essentielle pour une bonne gestion de l'azote en viticulture.***

# CHOIX DU PORTE-GREFFE : UN ART ET DES MÉTHODES

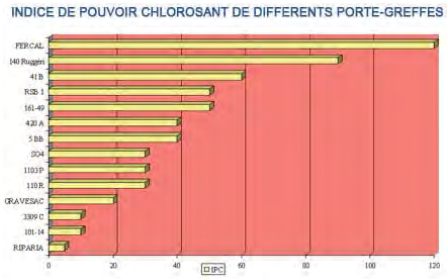
*Publié le 22 septembre 2011*

Le greffage de la vigne a pour origine la lutte contre le Phylloxéra et a permis de sauver le vignoble français à la fin du XIXème siècle. La technique consiste à associer deux fragments de végétaux : un porte-greffe apportant le système racinaire, et un greffon apportant les caractéristiques aériennes. Le choix de l'association porte greffe / greffon dépasse maintenant la simple protection sanitaire. En effet, le porte greffe, formant les racines de la vigne, va permettre d'exprimer les potentialités d'un terroir et en particulier l'influence du sol sur la typicité, l'originalité, la richesse et la finesse d'un vin.
Il assure le niveau et la qualité de l'alimentation minérale et hydrique de la souche par son système radiculaire avec une grande variabilité, selon les variétés, d'adaptation aux contraintes des sols et aux objectifs de production.

L'analyse de terre, sol et sous-sol, est un outil indispensable au choix du porte-greffe d'un point de vue technique mais aussi pour sécuriser l'investissement important que représente une nouvelle plantation. Dans la majorité des cas, il sera utile de la compléter par une observation visuelle du sol (profil pédologique) notamment pour apprécier la profondeur exploitable du sol et bien connaître le sol aussi dans sa dimension verticale.

## LES CRITÈRES AGRONOMIQUES D'ABORD …

**> Niveau en calcaire et pouvoir chlorosant du sol :**
Les risques de chlorose et de perturbation de la nutrition par des pH trop élevés ou une saturation du sol en calcium sont certainement les critères les plus déterminants pour le choix du porte-greffe. Une analyse du sol et du sous-sol permet de calculer l'Indice de Pouvoir Chlorosant (IPC) des sols calcaires. Cet indice résulte d'un rapport entre la proportion de calcaire actif et le fer facilement assimilable par la plante présent dans le sol. Chaque porte-greffe est caractérisé par une résistance à la chlorose ferrique spécifique. Cette résistance théorique peut être influencée par des facteurs climatiques (pluviométrie, alternances climatiques, températures …), par des caractéristiques structurales du sol (porosité, asphyxies…) et l'état végétatif de la vigne.




**> Sensibilité à la sécheresse du sol :**
Avec les évolutions climatiques, ce critère prend de plus en plus d'importance dans le choix d'un porte-greffe. La prise en compte du potentiel hydrique du sol est essentielle.

Certains sols se dessèchent fortement en été. Les causes de ces dessications peuvent être de plusieurs ordres :

- une texture grossière, une pauvreté en matière organique, une forte présence de cailloux (refus) et donc une Capacité d'Echange Cationique très faible (CEC inférieure à 3 Cmol+/kg de terre fine) : ces conditions confèrent une très faible capacité de rétention en eau du sol. Certains porte-greffes apportent toutefois une résistance supérieure de la vigne dans ces sols pauvres et secs (3309C ou R110 par exemple). Le R110 est aussi utilisable lorsque de la roche calcaire limite l'enracinement à faible profondeur, même si l'horizon superficiel (30 à 40 cm) est argilo-calcaire. Attention toutefois à la compatibilité cépage / porte-greffe.

- la présence d'un horizon imperméable en sous-sol (veine d'argile, présence d'alios,…) sous un horizon de surface de fertilité normale. Il convient alors souvent de réaliser des améliorations physiques et mécaniques du sol, comme des décompactages profonds. Grâce à ces interventions, l'eau pourra recirculer normalement (remontées capillaires en été) et le système racinaire de la future vigne pourra s'installer correctement. L'utilisation de porte-greffes résistants à la sécheresse n'est alors pas forcément nécessaire

**> Qualité de ressuyage du sol :**
La vigne doit être plantée dans des sols sains, se ressuyant correctement. Si certains porte-greffes sont plus sensibles que d'autres à l'excès d'eau, les racines ont besoin de respirer pour assurer l'alimentation hydrique et minérale du végétal. Pour cette raison, dans une parcelle qui présente des problèmes d'hydromorphie, il sera préférable d'utiliser du Fercal plutôt que du 420A ou du 161-49, même si l'IPC est moyen ou élevé.

Aussi, même si l'IPC n'est pas très élevé, dans une parcelle qui présente des problèmes d'hydromorphie, il sera préférable d'utiliser du Fercal plutôt que du 420A ou du 161-49

**> Fertilité du sol :**

- D'après R. MOREL (1989) la fertilité d'un sol est la *« facilité avec laquelle la racine peut bénéficier dans ce sol des différents facteurs de croissance : chaleur, eau, éléments chimiques nécessaires à la plante, substances organiques de croissance ».*

- La fertilité est donc la résultante de différents vecteurs (physiques, mécaniques, chimiques, biologiques) dont les composantes sont difficiles à apprécier séparément. L'analyse du sol tente de les approcher … et y parvient partiellement. Elle confère une certaine vision de la fertilité du sol, que l'on peut relier aux classements des porte-greffes selon la vigueur conférée.

## … MAIS PAS DE RECETTE MIRACLE

Il est souvent délicat de trouver le juste équilibre entre le potentiel du sol et la vigueur de la vigne, c'est-à-dire d'adapter le porte-greffe à la fertilité supposée du sol. Ce choix doit être, au départ, réfléchi en fonction des objectifs de production et de commercialisation : volume, type de vin, qualité…

D'une façon générale, on aura donc tendance à conseiller « des porte-greffes plus poussants sur les sols poussifs, et des porte-greffes plus poussifs sur les sols poussants !».

Le choix du porte-greffe devrait tendre, dans une certaine mesure, à compenser les facteurs limitants du sol. Toutefois, ces compensations ont leurs limites et tous les sols ne permettent pas la culture de la vigne.

**Enfin le choix du porte-greffe ne peut pas reposer uniquement sur les caractéristiques du sol. Il sera également conditionné par :**

- ***le cépage associé*** : par exemple, pour ceux qui présentent un cycle végétatif long, on utilisera de préférence des porte-greffes à cycle végétatif court.

- ***le climat :*** par exemple, dans les zones gélives on aura tendance à utiliser des porte-greffes permettant des débourrements plus tardifs.

- ***le couple porte-greffe / cépage***, en termes de disponibilité et de cohérence (compatibilité). A ce niveau, il est important de souligner le rôle primordial du pépiniériste dans le développement viticole : qualité du matériel végétal, conseils, accompagnement…

## POUR RÉSUMER, UN CHOIX RAISONNÉ DE PORTE-GREFFE NÉCESSITE :

- Des références sur le comportement des porte-greffes et des cépages cultivés dans la région

- Une bonne connaissance analytique et visuelle du sol et sous-sol

- La prise en compte des facteurs édaphiques

- La prise en compte des objectifs de production

- Le choix du porte-greffe et du cépage associé résulte toujours d'un compromis, parfois difficile, mais reste l'élément clé de la réussite d'une plantation.

# COUP DE MOÛT

*Publication du 11 juillet 2013*

Le moût de raisin est du jus qui n'a pas encore subi la fermentation alcoolique. Son acidité à la vendange va expliquer en grande partie celle du futur vin. L'acidité et le pH influent sur le déroulement de la fermentation malolactique, sur la conservation, sur le pouvoir antiseptique de l'anhydride sulfureux, sur la clarification et la stabilité des vins mais aussi sur leur appréciation visuelle et gustative. Ce critère constitue donc une des caractéristiques de base pour le vinificateur tant sur le plan analytique que sensoriel. Du point de vue de l'agronome, le potassium, considéré individuellement, mais aussi dans sa relation avec les autres éléments minéraux, surtout l'azote, est certainement l'élément qui intervient le plus sur l'acidité des moûts par son rôle sur leur équilibre acido-basique.

## D'OÙ VIENT L'ACIDITÉ DES MOÛTS ?

L'acidité est une des composantes essentielles de l'équilibre des vins (la différence, fondamentale, entre pH et acidité ne sera pas développée ici), en rapport avec l'alcool pour les vins blancs et l'alcool et les tanins pour les vins rouges (voir figure 1). La relation entre l'acidité des moûts et celle des vins est assez directe (voir figure 2).

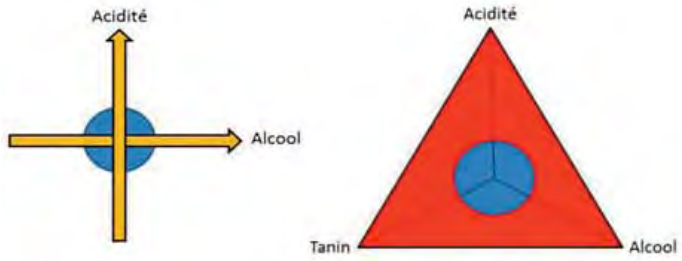



*Figure 1 : équilibre des vins blancs et rouges d'après www.presseraisin.com*

Dans des baies saines à la récolte, l'acidité est constituée à plus de 95% des acides tartriques, maliques et citriques. La concentration élevée d'acide tartrique (acide fort) est une des caractéristiques de la vigne avec des teneurs, à la maturité, variant de 3 à 9 g/l dans les moûts, selon les cépages, le stade de vendange et les conditions agro-climatiques. On trouve également des concentrations de 1 à 8 g/l d'acide malique (acide faible et fragile avec des niveaux toujours plus réduits dans les régions chaudes) et de 0.15 à 0.3 g/l d'acide citrique (beaucoup plus dans le cas de raisins parasités par le Botrytis cinerea). Le moût étant un milieu très tamponné, il est essentiel d'avoir un pH satisfaisant des baies à la vendange.

Le niveau d'acidité des moûts va dépendre également du degré de neutralisation de ces principaux acides (phénomène de salification) par les cations présents (principalement le potassium, mais aussi le magnésium et le calcium). Pratiquement, plus il y a de salification, plus les acides organiques sont neutralisés et plus le pH est élevé, ce qui est défavorable pour les futurs vins. La figure 2 donne un exemple de relation entre les niveaux de pH des moûts et des vins qui augmentent en fonction du niveau de la fertilisation potassique.

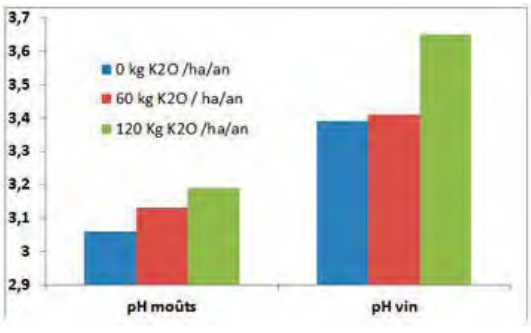



*Figure 2 : influence de la fertilisation potassique sur les pH des moûts et des vins (Cépage Cabernet Sauvignon, d'après Delas, 2000)*

## POTASSIUM : AMI OU ENNEMI DE LA VIGNE ET DU VIN ?

Le potassium est un élément totalement indispensable au fonctionnement de la vigne. Son rôle de salification des acides décrit ci-dessus, s'il est parfois pénalisant pour une utilisation des baies par l'homme, est absolument nécessaire à la cellule végétale pour éviter qu'elle ne s'intoxique par ses propres déchets (à relier aux phénomènes de brulures périphériques du limbe observées en cas de carences potassiques). Le magnésium et surtout le calcium jouent le même rôle.

Un autre rôle fondamental du potassium est son intervention sur la synthèse et la migration des sucres de la feuille vers les organes d'accumulation (organes en croissance, bois, racines et baies). En l'absence de potassium, les sucres issus de la photosynthèse ne sont pas évacués de la feuille (phénomènes de translocation) qui devient alors inactive tant qu'elle reste saturée en glucides. A noter que ce phénomène nécessitant des écarts thermiques suffisants, ce blocage de l'activité foliaire peut aussi survenir en été quand les nuits sont trop chaudes. Ainsi, sans potassium, il n'y aurait pas de sucres dans les baies, donc pas d'alcool dans les vins.

Le potassium, un des rares éléments minéraux véhiculés par la sève phloemienne, participe également à de nombreux systèmes enzymatiques et au comportement hydrique de la vigne (absorption de l'eau par les racines, limitation de l'évaporation foliaire par contrôle des stomates…). Une vigne manquant de potassium résistera moins aux difficultés climatiques estivales.

Le potassium est l'élément le plus présent dans le raisin et en représente, à la récolte, près de 50% des matières minérales totales. Il s'accumule continuellement dans la baie au cours de son développement avec un accroissement significatif à partir de la véraison. Les concentrations potassiques des baies vont varier fortement selon les conditions climatiques de l'année, comme le montre la figure 3. On peut, par exemple, montrer l'incidence d'une année pluvieuse sur une moindre acidité des mouts liée à une assimilation plus importante de potassium par les plantes

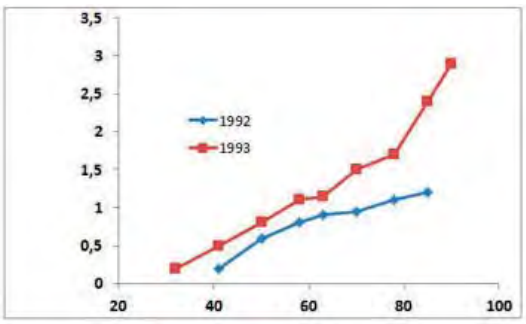



*Figure 3 : évolution des teneurs en potassium (mg/baies) des baies sur 2 années (Cépage Semillion, d'après C. Chardonnet, 1994)*

[...]

[...]

## L'EXCÈS DE POTASSIUM, SEUL RESPONSABLE DES pH TROP ÉLEVÉS DANS LES MOÛTS ?

Une disponibilité potassique excessive (fertilisation, réserves du sol, forte pluviométrie...) est-elle la seule responsable d'un manque d'acidité des moûts et des vins ? L'acidité des baies dépend en fait de nombreux autres facteurs :

- Le couple porte greffe / greffon : à relier à la vigueur conférée, à l'adaptation au pH du sol, au taux de calcaire actif, à la résistance à la sécheresse, etc.
- L'enherbement : permanent, il induit généralement une diminution de l'acidité totale des moûts alors que le pH est comparable ou inférieur à celui des parcelles en sol nu ; les disponibilités azotées et hydriques apparaissent comme les deux clés de lecture de l'effet de l'enherbement sur l'acidité des moûts.
- Les conditions climatiques : de fortes chaleurs, par exemple, vont entraîner une consommation énergétique supplémentaire conduisant à une baisse des acides maliques de la baie (d'où l'importance d'une bonne gestion du rapport feuille/fruit, et de l'effeuillage/rognage).
- L'azote joue un rôle aussi important que le potassium sur le potentiel qualitatif des baies (un prochain Agro Reporter développera les fonctions de cet élément). En plus de leur rôle fondamental dans les fermentations et les développements microbiens, les substances azotées participent à la valeur alimentaire du vin et à sa définition gustative. L'azote intervient à deux niveaux sur l'acidité : soit directement en maintenant l'axe végétatif donc les fonctions acides (par exemple, une disponibilité azotée suffisante en fin de cycle de maturation permet d'éviter une dégradation trop rapide de l'acide malique et les sur-maturations), soit indirectement en équilibrant le potassium (le rapport azote / potassium étant à la base de l'équilibre végétatif / fructifère de la vigne). Certains auteurs résument le rapport acides / sucres des baies à leur rapport azote / potassium.
- D'autres éléments minéraux vont également participer à la définition de l'acidité des moûts, surtout pour leurs relations avec l'azote et le potassium : par exemple le cuivre pour son antagonisme avec le potassium ou le manganèse, magnésium et soufre pour leur rôle sur l'efficacité de l'azote.

Le type de vinification est également à prendre en compte dans la gestion de l'acidité des baies. Dans le cas d'une vinification sans fermentation malolactique, l'influence des pratiques culturales est déterminante sur le taux d'acide malique et donc sur le niveau d'acidité des vins. A l'inverse, pour une vinification avec fermentation malolactique, l'importance des pratiques culturales est relativisée par la dégradation de l'acide malique et le ratio acide tartrique / acide malique est alors prépondérant (même si la préservation de l'acide malique par les pratiques culturales reste déterminante).



## QUELS OUTILS DE CONTRÔLE AU VIGNOBLE ?

Comme dans tout problème agronomique, l'analyse de sol sera le premier élément à considérer, en cas de perturbation de l'acidité des moûts, avec trois axes de lecture : les réserves en potassium (et leurs équilibres avec les autres cations : calcium, magnésium et parfois sodium), le potentiel hydrique du sol (texture, Réserve Utile, pourcentage de terre fine, profondeur du sol, niveau et état de la matière organique, CEC...) et sa fourniture potentielle en azote.

Pour une approche annuelle, les analyses de baies et de pétioles amènent des informations fiables sur les concentrations en azote et potassium et donc le potentiel d'acidité des moûts. La figure 4 illustre la relation entre les niveaux en potassium des pétioles, des moûts et des vins. L'analyse de baies donne certainement les indications les plus pertinentes pour la gestion des vendanges et de la vinification, mais renseigne peu sur l'état végétatif des ceps. Sur le terrain, le viticulteur préfèrera souvent l'analyse de pétioles, à la véraison notamment, qui apparaît comme un bon compromis pour estimer les équilibres minéraux des baies et la nutrition de la vigne, en permettant encore quelques interventions et choix techniques.

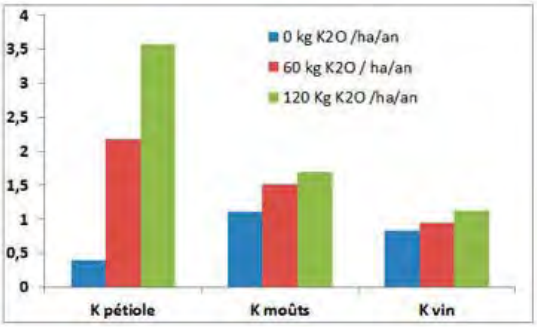



*Figure 4 : concentration en potassium des pétioles (%MS), baies (%MS) et moûts (g/l) en fonction de différents niveaux de fértilisation potassique (Cépage Cabernet Sauvignon, d'après Delas, 2000)*

Les évolutions climatiques à venir vont rendre de plus en plus nécessaire la prise en compte de l'équilibre acido basique des moûts dès l'implantation du vignoble (choix des terrains, du matériel végétal, de la densité...) et tout au long de la vie des ceps (fertilisation, enherbement, travail du sol, conduite, irrigation...).

Le Service Agronomie du LCA est à votre disposition pour toute information complémentaire. N'hésitez pas à nous contacter !

# DE L'EAU DANS LE VIN

*Publié le 8 septembre 2011*

La vinification est une opération très consommatrice d'eau. Sur l'ensemble du process, les caves ou les chais génèrent donc des volumes importants d'effluents, souvent équivalents au volume de vin produit.

La valorisation des effluents vinicoles par épandage est le moyen de traitement le plus répandu en France, adopté par de nombreux viticulteurs. Simple à mettre en œuvre, peu coûteuse, cette pratique est encadrée par plusieurs textes réglementaires.

## DÉCHET, OUI MAIS …

Les effluents vinicoles sont issus du nettoyage des cuves de vinification dans les caves ou les chais. Assimilés aux Déchets Industriels Banals (DIB) - rattachés aux codes déchet 02 07 01, 02 07 02 ou 02 07 05 - ce sont des effluents liquides chargés en matières organiques. Leur traitement par épandage agricole repose notamment sur la capacité épuratoire du système « sol - micro organismes – plantes », qui assure la filtration des MES, la fixation puis la minéralisation des matières organiques et l'utilisation par les plantes des éléments minéraux libérés. Rappelons que réglementairement, un déchet n'est valorisable en agriculture que si son aptitude à l'épandage est démontrée (concentrations en métaux et en certains composés organiques inférieures aux valeurs seuils réglementaires), mais surtout s'il présente un intérêt agronomique. Or, concernant les effluents vinicoles, on a coutume d'affirmer qu'ils ne présentent pas ou peu d'intérêt agronomique. Est-ce tout à fait vrai ?

## UNE VÉRITABLE VALEUR FERTILISANTE, OUI MAIS…

Certes ces effluents sont sans effet sur la stabilité ou la structure des sols car la matière organique qu'ils apportent est facilement dégradable et elle ne participe pas au processus d'humification dans le sol. Mais leur intérêt nutritif est loin d'être négligeable, notamment par les quantités de potasse et d'azote susceptibles d'être apportées.

Toutefois, les effluents vinicoles se caractérisent par la variabilité de leur composition selon l'époque de l'année et les types de vinification.

Exemple en Bordelais et en Charentes, sur les périodes de plus forte production de ces effluents (vendanges et soutirage) :

| Paramètres | Unités | Période de vendanges | Période de soutirage |
|---|---|---|---|
| pH | - | 4,1 à 6,2 | 3,5 à 6,5 |
| Conductivité | µS/cm | 1400 à 3000 | 2500 |
| MES (Matière En Suspension) | mg/l | 940 | 1 250 |
| DBO5 (Demande Biochimique en Oxygène) | mg/l | 3 000 à 17 000 | 2 650 |
| DCO (Demande Chimique en Oxygène) | mg/l | 4 500 à 19 000 | 5 300 |
| Azote total | mg N/l | 94 à 140 | 220 |
| Phosphore en mg/l | mg $P_2O_5$/l | 60 à 120 | 60 |
| Potassium en mg/l | mg $K_2O$/l | 250 à 480 | 250 |

Source : Analyses LCA

Raisonner l'épandage des effluents vinicoles passe par la tenue de plans et de cahiers d'épandage permettant d'ajuster les apports en éléments fertilisants aux besoins des cultures.

Ce sont également les outils qui permettent d'enregistrer les pratiques de fertilisation sur l'exploitation. Leur tenue à jour est obligatoire pour :

> être en conformité avec la réglementation des installations classées,

> demander des aides pour la gestion des effluents vinicoles environnementales.

Raisonner l'épandage des effluents passe également par l'estimation de la capacité d'absorption maximale du sol afin d'éviter tout ruissellement ou percolation trop rapide dans le profil du sol.

La RFU (réserve facilement utile en eau) peut être estimée à partir d'une analyse granulométrique du sol. Exprimée en mm/m de sol, elle permet de calculer le volume maximal d'effluent épandable par ha.

## ESTIMATION DES QUANTITÉS D'ÉLÉMENTS NUTRITIFS APPORTÉS PAR HECTARE

Exemple de raisonnement sur la base de la RFU

| RFU (en mm/m de sol) | Profondeur de sol (couche arable) | RFU retenue | Marge de sécurité * | RFU exploitable | Volume maxi par ha |
|---|---|---|---|---|---|
| 55 | 35 cm | 19 mm | 30% | 13,5 mm | 135 m3/ha |

Prenons le cas de l'épandage d'effluents vinicoles en période de vendange. Voici un résumé des quantités d'éléments nutritifs (en unités/ha) apportées en fonction des volumes épandus à l'hectare.

| | | Doses d'apport (en m3/ha) | | |
|---|---|---|---|---|
| Eléments fertilisants | Concentrations effluent (en mg/l) | 100 | 125 | 150 |
| N | 110 | 11 | 14 | 17 |
| P2O5 | 90 | 9 | 11 | 14 |
| K2O | 400 | 40 | 50 | 60 |

A noter que la potasse présente contenue dans l'effluent est totalement disponible pour l'alimentation des cultures. L'azote se présente majoritairement sous des formes facilement disponibles (azote organique facilement minéralisable). Il conviendra de prendre en compte cet azote dans le raisonnement de la fertilisation des cultures et dans le bilan des apports, notamment si la parcelle d'épandage se situe en zone vulnérable.

Si l'intérêt nutritif des effluents vinicole est donc flagrant, il est nécessaire de s'assurer que leur pH ne soit pas trop acide. Pour un pH inférieur à 5.5, l'étude préalable à l'épandage doit montrer l'aptitude des sols à recevoir des effluents acides. Il est également important de contrôler que l'effluent ne présente pas une conductivité excessive, notamment s'il est destiné à être épandu sur des cultures en place sensibles à la salinité.

L'analyse régulière de la qualité des effluents vinicoles est le meilleur moyen de s'assurer d'une valorisation optimale de la valeur nutritive du déchet en toute conformité avec la réglementation existante.

***> Une documentation est disponibler auprès de notre service communication***

# PÉPINIÈRE VITICOLE : RECHERCHE VIRUS !!

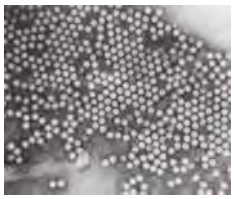
*Publié le 16 janvier 2014*

Dans le domaine viticole, greffons et porte-greffes peuvent transmettre à leur descendance des agents pathogènes lorsqu'ils en sont eux-mêmes porteurs. C'est pourquoi le contrôle du matériel de base est particulièrement important vis-à-vis des virus de la vigne, qui sont transmis très efficacement par greffage. Quels sont les virus recherchés en pépinière viticole ? Quelles sont les modalités de ce contrôle ? Cet article vient compléter les parutions antérieures de l'Agro Reporter sur le thème des phytovirus et de la sélection clonale : Virus vitifera ou l'effet papillon, Elisa.

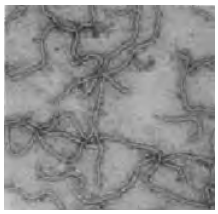
## Virus en cause

Les principaux virus dommageables à la culture de la vigne appartiennent aux groupes des Népovirus, des Ampélovirus et des Clostérovirus.

Les **Népovirus**, de forme sphérique, sont transmis à la vigne par des nématodes présents dans le sol. Ces virus sont responsables des maladies de dégénérescence de la vigne. Deux de ces virus sont d'importance majeure car ils provoquent la maladie du Court-Noué de la Vigne : l'Arabis Mosaic Virus (ArMV) et le Grapevine Fan Leaf Virus (GFLV).
Les **Clostérovirus et Ampelovirus** sont constitués de longues particules filamenteuses et flexueuses. Ils sont transmis par des insectes aériens, les cochenilles. Une dizaine de ces virus ont été décrits sur la Vigne, responsable des symptômes d'enroulement foliaire. Trois d'entre eux sont couramment rencontrés sur le territoire national : deux Ampelovirus, les Virus de l'Enroulement de la Vigne Types 1 et 3 (Grapevine Leaf Roll Virus : GRLaV-1 et GLRaV-3), et un Clostérovirus, le Virus de l'Enroulement de la Vigne Type 2 (GLRaV-2).



**Népovirus**



**Clostérovirus**

*Particules virales vues en microscopie électronique*

## Obligation de contrôle en pépinière

La réglementation en vigueur, fixée par l'Arrêté du 20 septembre 2006 relatif à la sélection, à la production, à la circulation et à la distribution des matériels de multiplication végétative de la vigne, rend obligatoire pour les pépiniéristes viticoles le contrôle sanitaire des parcelles de vignes mères de greffons et de porte-greffes vis-à-vis des maladies virales du **Court-Noué** (Virus ArMV et GFLV) et de l'**Enroulement Viral (les virus concernés étant le GLRaV-1 et le GLRaV-3).** Cette réglementation a pour objet l'éradication des parcelles de vigne-mères virosées et la mise en circulation de jeunes plants de vigne indemnes d'infections virales, garantissant ainsi la non propagation des virus lors des opérations de greffages porte-greffes / greffons et d'implantation des jeunes plants de vigne sur les parcelles de production.

## Modalités de contrôle

*France Agrimer (1)* est l'organisme officiel chargé du contrôle des bois et plants de vigne. Ses agents veillent au respect de la traçabilité du matériel végétal et délivrent, avant commercialisation, un certificat attestant du respect des règles de production des plants de vigne en catégorie certifiée.
Les professionnels prennent en charge eux-mêmes les suivis de leurs parcelles dans le cadre d'un autocontrôle : un premier test virologique est réalisé en 5ème feuille (au plus tard 5 années après plantation), puis la parcelle doit être contrôlée tous les dix ans.
Le test mis en œuvre pour le diagnostic virologique est un test sérologique ELISA (acronyme d'Enzyme Linked Immuno Sorbent Assay) effectué au laboratoire. Il s'agit d'une méthode immunochimique combinant une réaction de type antigène / anticorps couplée à une réaction colorimétrique qui permet de mettre en évidence les protéines constitutives des virus (marqueurs de l'infection virale) dans des extraits végétaux. Les tests sont réalisés, par des laboratoires agréés, selon les préconisations d'une Méthode Officielle (Détection des Virus de la Vigne par la technique sérologique DAS-ELISA – Méthode vv./04/05 version b) développée par le Laboratoire de la Santé des Végétaux (laboratoire national de référence rattaché à l'ANSES (2)).

*Test ELISA – Réaction colorimétrique*

**Les tests ELISA** sont préférentiellement réalisés sur bois aoûtés, pendant la période hivernale de repos végétatif de la vigne. Les protocoles de prélèvement et d'échantillonnage sont établis par France Agrimer.
Le Laboratoire LCA est un acteur majeur du contrôle sanitaire en pépinières viticoles depuis plus de vingt ans. Sur les dix dernières années, le laboratoire a analysé près de 150 000 échantillons dans le cadre de ces contrôles.
Le laboratoire est agréé par le ministère de l'agriculture et accrédité COFRAC pour la Détection des Virus de la Vigne par la technique sérologique DAS-ELISA. Il est conventionné par France Agrimer pour la Réalisation d'Analyses des Viroses de la Vigne dans le cadre du Contrôle et de la Certification des Bois et Plants de Vigne.

*Symptômes de dégénérescence caractéristiques de la maladie du court-noué sur Chardonnay*

*Symptômes d'Enroulement Viral*

*(1) - L'Établissement national des produits de l'agriculture et de la mer, également appelé France AgriMer, est un office agricole français ayant pour mission d'appliquer, en France, les mesures prévues par la Politique agricole commune, et de réaliser des actions nationales en faveur des différentes filières agricoles.*
*(2) - L'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Anses) est l'agence nationale française chargée de la sécurité sanitaire. Elle résulte de la fusion des précédentes agences.*

# PHYSIOLOGIE ET NUTRION VEGETALE

L'AGRO REPORTER

EDITION COMPLETE

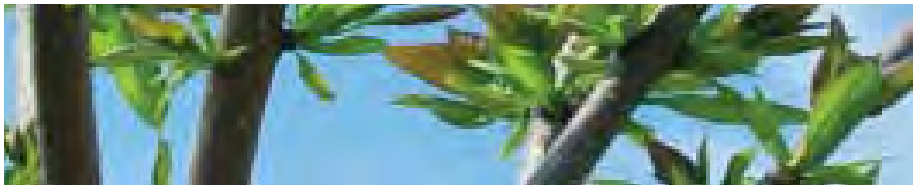
# FERTIPLANTE : UN NOUVEL OUTIL D'INTERPRÉTATION DU VÉGÉTAL

*Publié le 25 novembre 2010*

Le raisonnement d'une analyse de sol se base sur une interprétation en terme de potentiel. Ce potentiel s'exprime ou pas en fonction de multiples facteurs (climatiques, édaphiques…). L'analyse de végétal, par contre, donne la réalité de l'état de la plante à un moment donné. Ces informations sont indispensables pour avoir un raisonnement complet de la nutrition.

Le laboratoire LCA vient de finaliser un nouveau logiciel expert d'interprétation et de présentation des résultats. Dans le lien à suivre, il vous en présente le raisonnement.

Opérationnel pour la campagne des analyses hivernales de bois (rameaux, sarments), cet outil sera également utilisé pour les analyses foliaires (pétioles, limbes) et les analyses de fruits.



FERTIPLANTE s'inscrit dans la recherche constante du laboratoire LCA pour que les analyses agronomiques soient de réels outils de prises de décision.

Cependant, qu'elle que soit la qualité de l'analyse et de son interprétation, la réalité du terrain et la qualité des échanges avec son utilisateur ou prescripteur restent primordiaux.

L'évolution des outils de LCA se fait donc parallèlement au maintien d'une équipe d'agronomes au sein du laboratoire et à l'affirmation de la nécessité d'accompagner les analyses sur le terrain.

# APOPTOSE AUTOMNALE *(PARTIE 1/2)*

*Publication du 8 novembre 2012*

*Vignes rouges*. Huile sur toile de Vincent Van Gogh (1888). Musée Pouchkine, Moscou.

Les grecs anciens parlaient d'« apoptosis » pour désigner la chute des feuilles à l'automne. Le terme d'apoptose est actuellement utilisé pour désigner le phénomène de Mort Cellulaire Programmée (MCP), ou de suicide cellulaire. Cette notion, surtout utilisée pour les cellules animales, apparaît de plus en plus présente chez les végétaux, même si on n'en comprend pas encore tous les mécanismes. La plante utiliserait, par exemple, des phénomènes de type MCP pour se défendre contre certains pathogènes selon un programme génétique établi (plusieurs éliciteurs se basent sur ce principe).

La chute des feuilles à l'automne est-elle de nature apoptotique ? Ou, pédanterie mise à part, quelles sont les raisons de la chute des feuilles ? Ce phénomène est-il utile à l'arbre ou au cep ? Du point de vue du laboratoire et du conseiller : comment interviennent les conditions de la chute des feuilles sur les composantes minérales et organiques de la mise en réserve évaluées par l'analyse de bois ?

## MÉCANISME DE LA CHUTE DES FEUILLES

La chute des feuilles correspond à des mécanismes d'économie d'énergie et de protection. Les parties ligneuses (aériennes ou souterraines) sont plus résistantes au froid que les feuilles et permettent la survie du végétal avec une consommation énergétique réduite. Le maintien de la frondaison en période hivernale serait inutilement énergivore, sauf pour des arbres comme les conifères dont les feuilles ont des formes et compositions différentes. Par ailleurs, l'absence d'activité photosynthétique limite fortement la consommation énergétique des arbres en période défavorable. Les conditions climatiques de l'automne, baisse des températures et surtout raccourcissement des périodes diurnes (photopériodisme), sont perçues par des capteurs spécifiques de la feuille et s'y traduisent par une forte augmentation des concentrations en éthylène (l'éthylène, hormone de la maturation, a été découverte en 1901 en constatant que les feuilles des arbres situés à proximité des lampadaires à gaz, chutaient prématurément).

Ce signal conduit à la création d'une zone liégeuse à la base du pédoncule des feuilles qui, privées d'eau et de nutriments, cessent leur activité photosynthétique et donc ne peuvent plus régénérer la chlorophylle, molécule instable. La perte de la couleur chlorophyllienne verte permet de faire apparaître les couleurs, plus ou moins spécifiques à chaque espèce ou variété, issues des anthocyanes (rouge vif à violet), carotènes (orange), xantophylles (jaunes) et autres phénols, normalement masquées. Dans les régions viticoles, la reconnaissance des différents cépages par leurs robes automnales est toujours un spectacle éblouissant, d'autant que son expression, du fait de la sensibilité des anthocyanes au pH, peut être différente selon l'acidité du milieu.

La couche liégeuse constitue également une zone d'abscission à partir de laquelle la feuille va se séparer de la branche, la cicatrice sur le bois étant également protégée de liège. Le mécanisme de la chute des feuilles n'a donc rien d'un phénomène passif. Chacun peut observer qu'elles ne tombent pas simplement parce qu'elles sont mortes. On le voit bien lorsqu'une branche est coupée en été : les feuilles meurent, mais restent bien fixées. Ainsi le végétal prépare de façon active cette phase de son cycle de végétation.

## MESURE PROTECTRICE POUR LA PLANTE

La bonne constitution de cette couche liégeuse sur la cicatrice des feuilles est essentielle pour la protection au froid, mais aussi pour se prémunir de l'entrée de certains pathogènes. Dans des conditions climatiques peu favorables, il est parfois effectué des traitements spécifiques pour protéger et favoriser la cicatrisation de cette zone d'abscission.

Conjointement à cette chute foliaire, les cellules des parties ligneuses vont se protéger du gel en se déshydratant (d'où la diminution des diamètres des bois en hiver) et en stockant des substances cryoprotectrices (protéines et sucres) qui abaissent le point de congélation cellulaire. Certains auteurs estiment que les irrégularités de production, ou alternances, sont accentuées par la sensibilité au gel : la trop forte charge d'une année ne permettant pas au végétal de stocker une quantité suffisante de glucides dans les bois pour bien résister au gel. Sur une variété facilement alternante, comme golden chez la pomme, le niveau de réserves glucidiques dans un rameau peut ainsi varier d'un facteur 1 à 4 selon le niveau de charge de l'année antérieure !

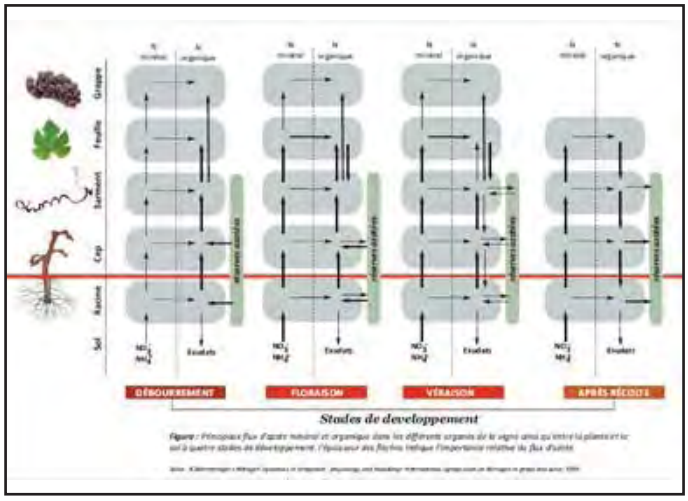
# APOPTOSE AUTOMNALE *(PARTIE 2/2)*

*Publication du 15 novembre 2012*

La partie 1/2 d' « Apoptose automnale » nous expliquait qu'à l'automne, la séparation de la feuille du reste de la plante se fait progressivement sous contrôle enzymatique et hormonal, essentiellement en fonction du photopériodisme. Selon les années, cette chute des feuilles est plus ou moins précoce. Ce n'est pas sans conséquence sur la mise en réserve du végétal.

## RECYCLAGE AUTOMNAL

Lorsque l'abscission des feuilles se prépare, cela se traduit par une évolution des couleurs du feuillage, qui coïncide avec une phase importante de recyclage des composés présents. Ce sont principalement le carbone et l'azote, issus des chlorophylles et protéines, qui sont transférés vers les parties ligneuses pour y être stockés.



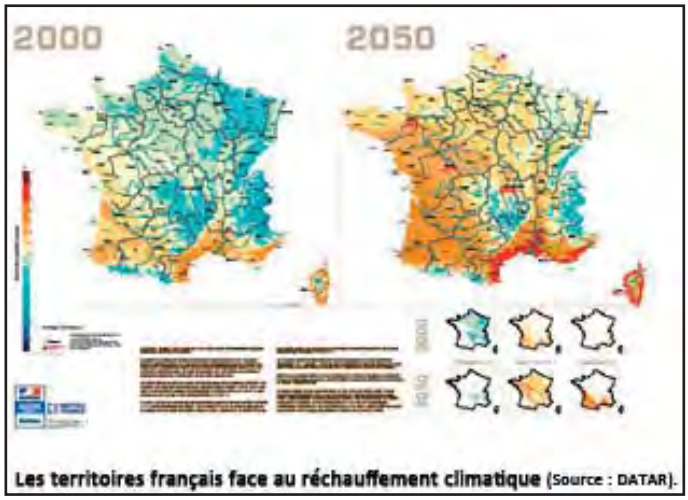

*Source : B Wermelinger, 1991. Nitrogen Dynamics in Grapevine : physiology and modeling. International Symposium on Nitrogen in Graps and Wine (1991)*

Ce recyclage peut représenter plus de 85% de l'azote foliaire. Il semble peu influencé par le niveau de nutrition azotée. Par contre une trop faible concentration azotée foliaire conduit à une moindre remobilisation au printemps suivant.
Une chute ou une dégradation trop rapide des feuilles par le gel pénalise cette mise en réserve. Des attaques parasitaires ou des traitements phytosanitaires agressant le feuillage ont les mêmes conséquences. On a pu observer ainsi, dans des sarments de vigne de la même parcelle, des écarts de 1 à 3 en concentration azotée entre la zone gelée et la zone indemne.

## EFFET DES AUTOMNES TARDIFS

Tandis que les modèles climatiques nous prédisent des maturations de plus en plus précoces (voir à ce sujet le rapport du programme CLIMATOR de l'ADEME), les évolutions climatiques entraînent dans certaines régions des chutes de plus en plus tardives des feuilles.

Jusqu'à présent, les différentes études menées sur ce sujet montrent que la mise en réserve ne serait pas pénalisée, les feuilles adultes étant peu consommatrices (dans la mesure où le gel qui les fera chuter n'est pas trop brutal). Par contre, il est essentiel que cette persistance végétative ne se traduise pas par une reprise végétative qui consommerait une partie des réserves des bois préalablement stockées pour l'année suivante.




**Les territoires français face au réchauffement climatique** (Source : DATAR).

Les éventuelles techniques de post-récolte (gestion de l'irrigation s'il y a lieu, protection phytosanitaire, soutien foliaire, apport minéral au sol…) doivent donc viser uniquement un maintien végétatif et sont à utiliser avec prudence.
De même, il est probable que ces changements météorologiques vont obliger certains producteurs à apprendre à faire chuter les feuilles (par exemple pour les fruits à noyau dans le Sud Est), le climat ne permettant plus un arrêt végétatif correct, au risque de pénaliser le potentiel de production. Il est alors essentiel de bien respecter une progressivité dans les stress appliqués aux arbres.

La mise en réserve commence dès le début de l'été mais seul l'azote présente la possibilité d'être « sur-assimilé » en fin de cycle. Pour les autres éléments minéraux il n'y a pas ou très peu de compensation possible. Il en est de même pour les réserves glucidiques (amidon). Pour la reprise végétative du printemps suivant, les stress les plus à craindre sont donc ceux que subit l'arbre ou la vigne en été : sécheresse, canicule, défoliation, attaque parasitaire, excès de charge….. Une chute foliaire estivale se traduira directement par une augmentation de la sensibilité au gel hivernal, un débourrement retardé et hétérogène et une moindre densité de feuillage et/ou de charge.

## OUTILS À LA DISPOSITION DU CONSEIL

La chute des feuilles, sous nos climats tempérés, s'inscrit donc bien dans un programme établi voisin des phénomènes d'apoptose et apparaît nécessaire à la majorité des plantes pérennes pour la résistance aux difficultés hivernales et pour la préparation de l'année suivante.
Le déroulement de ce phénomène est un facteur de variabilité des réserves glucidiques et minérales de l'arbre ou du cep qui vont influer sur l'état végétatif et la production des années suivantes. Il est donc nécessaire de le prendre en compte dans la lecture et l'interprétation des analyses de bois.

Les analyses de rameaux ou sarments présentent la particularité, par rapport aux autres analyses de végétaux, de prendre en compte les réserves en glucides, sucres et amidon, qui forment pondéralement l'essentiel des composés mis en réserve. Par ailleurs, leur prélèvement en fin de cycle (période de repos végétatif) permet d'avoir un reflet pertinent et stable des réserves. Les autres analyses de végétaux (limbes, pétioles, baies) vont indiquer un éventuel état de stress au moment du prélèvement (notamment des difficultés estivales), à même de pénaliser la mise en réserve, mais seule l'analyse de bois peut en faire un constat exact.

*L'équipe d'agronomes de LCA est à votre disposition pour répondre à vos questions et échanger sur ces problématiques.*

# PRENDS GARDE À LA COULEUR DES FEUILLES

*Publication du 13 juin 2013*

Au laboratoire, une des différences essentielles entre l'analyse de sol et celle de plante réside dans le fait que pour l'analyse de sol on ne dose jamais, contrairement aux végétaux, l'élément minéral « total », mais la fraction estimée disponible aux racines. Cela entraîne des discussions possibles sur le modèle utilisé, mais aussi une nécessaire distinction à faire, dans la lecture du bulletin de l'analyse de terre, entre la notion de présence et la notion de disponibilité. On pourrait donc penser que l'analyse de végétal est plus accessible que celle du sol. Pourtant elle reste peu pratiquée en France, pour des raisons historiques, mais aussi parce que de très nombreux facteurs de variabilité rendent son interprétation plus délicate. L'objet de cet Agro Reporter est de donner quelques clés d'approche et de compréhension de l'analyse foliaire pour ne pas risquer les « deux périls pour l'esprit : mésestimer les complexités de la nature ou s'en laisser décourager au point qu'on se rabatte sur le surnaturel ». (J. ROSTAND, Ce que je crois, 1953).

## VÉRIFIER LE PRÉLÈVEMENT ET LE STADE PHYSIOLOGIQUE

Il faut partir du principe que le végétal est prélevé au stade normatif, c'est-à-dire là où la variabilité de la composition minérale est la plus faible, mais aussi pour lequel il existe des références. On prélèvera toujours des feuilles actives, c'est-à-dire ayant atteint leur développement maximal (et donc non consommatrices) et non sénescentes (les résultats n'étant alors plus interprétables). L'important est aussi que l'organe prélevé soit précisément identifié (limbe, feuille entière, pétiole, …) et que l'analyse soit reproductible d'un laboratoire à l'autre. Cette remarque est fondamentale, et limite la pertinence de certains types d'analyses de végétaux telles que les analyses de sève. Le processus d'extraction, le plus souvent par pression, entraîne le prélèvement d'une part indéterminée de phloème et xylème, selon l'état de l'organe, son âge et l'intensité de la presse.

*Pour plus d'information sur le prélèvement de végétal, on pourra se reporter à l'article de l'Agro Reporter « Gros plan sur le prélèvement en vigne », et au « Guide des prélèvements » du LCA.*

Si le prélèvement est effectué à un stade référencé, le laboratoire compare les résultats de l'analyse foliaire à des références prenant en compte l'espèce, la variété, la région, le type de sol, les objectifs, le mode de conduite, le rendement etc. selon la richesse de sa base de données. Les références peuvent également être modulées par les conditions climatiques de l'année si elles sont atypiques. Le calage d'une référence adaptée est aussi important pour l'interprétation que la qualité du prélèvement ou de l'analyse. Pour diminuer ces sources de variabilité, les agronomes anglo-saxons ou espagnols recommandent d'effectuer des suivis de végétaux, la comparaison se faisant alors entre les différents prélèvements, en termes d'évolution. Encore peu réalisée en France sur cultures pérenne, cette pratique est couramment utilisée sur cultures intensives (cultures hors-sol : tomates, concombres, …).

*Le prélèvement foliaire ne se fait que sur feuilles adultes*

A noter que l'analyse comparative d'un lot « sain » et d'un lot « à problème » est toujours à faire avec précaution dans la mesure où il faut d'abord s'assurer de la qualité du témoin utilisé.

## RAISONNER EN VOLUME

Comme pour les analyses de sol, les résultats de l'analyse minérale foliaire sont, normativement, exprimés en concentration (%, ‰ ou ppm par rapport à la matière sèche). De la même façon que l'interprétation d'une analyse de terre nécessite un raisonnement en volume (profondeur, pourcentage de cailloux…), la bonne interprétation d'une analyse foliaire nécessite également de ramener les résultats au volume de l'organe ou du végétal. Il est en effet fréquent, surtout en plantes pérennes, de rencontrer deux analyses foliaires cohérentes et quasiment identiques, l'une provenant d'un végétal à grand volume et l'autre d'une plante, trop petite pour assurer un niveau de production correct, mais équilibrée. Un végétal, comme la vigne ou le pommier, a en effet la capacité d'adapter son volume aux conditions pédoclimatiques. Le conseil sera alors, par la taille ou le changement de fertilisation, de déséquilibrer temporairement l'arbre ou le cep pour l'amener à un volume supérieur, si le potentiel édaphique et climatique le permet.

On rencontre également fréquemment sur les analyses foliaires des phénomènes de concentration (tous les éléments minéraux sont équilibrés mais avec des niveaux élevés) ou de dilution (les éléments minéraux sont équilibrés, mais avec de faibles concentrations globales). Là aussi, ces types de profils sont à ramener au volume de l'organe : de faibles concentrations pourront être considérées comme correctes si la surface foliaire est élevée, mais anormales si elle est faible.

L'interprétation de la matière sèche ou du poids sec foliaire apporte quelques informations mais n'est pas suffisante pour apprécier le volume des organes. L'expression la plus correcte physiologiquement serait donc la quantité d'élément par organe, par pied ou plant, voire par unité de surface (que l'on peut alors comparer à une surface foliaire ou à une biomasse totale). Ce type d'approche est malheureusement difficilement réalisable au laboratoire. Pratiquement, la connaissance de la parcelle est donc nécessaire pour une bonne interprétation d'une analyse foliaire.

## VÉRIFIER L'ÉTAT VÉGÉTATIF

L'équilibre entre l'azote et le calcium est à la base de la nutrition et de la croissance du végétal pour l'élongation d'une part et la structuration cellulaire d'autre part. Ce thème a été développé dans l'article « Chronique calcique » de l'Agro Reporter. Le rapport azote / calcium diminue considérablement entre les jeunes feuilles, les feuilles adultes, puis les feuilles sénescentes, avec une évolution bien référencée pour la plupart des espèces en fonction des stades physiologiques (voir exemple figure 1).

Le rapport N / Ca permet donc, dans un premier temps, de vérifier la concordance de l'analyse avec la référence choisie. Dans un deuxième temps, son interprétation amène des informations sur l'état végétatif du végétal : élevé, il montre un végétal vigoureux ou juvénile ; limité, il indique un végétal faible ou sénescent (excès de charge, manque d'eau, attaques parasitaires, problèmes racinaires…). Même si les excès d'azote ou le manque de disponibilité en calcium (pour équilibrer l'azote) existent en tant que tels, ils sont souvent confondus sur les analyses foliaires avec des retards ou des précocités de développement ou des décalages végétatifs.

[...]

[...]

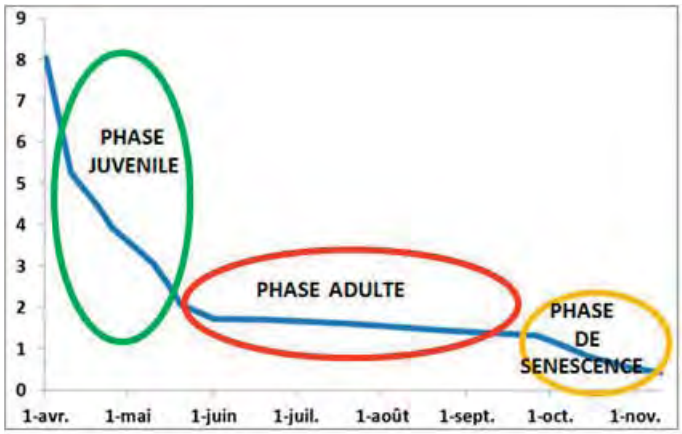



*Figure 1 : Evolution du rapport azote / calcium foliaire pour le prunier d'Ente. Source : BIP / ESERCA.*

## RAISONNER PAR GROUPES FONCTIONNELS ET EN ÉQUILIBRES

En termes d'interprétation des analyses foliaires, les nouvelles approches de la nutrition amènent à raisonner les éléments non plus individuellement, mais par groupes d'éléments ayant des fonctions voisines ou complémentaires. Cette approche reste issue de la fameuse loi du minimum de Sprengel (1828) et Liebig (1850), en l'adaptant à la complémentarité entre éléments. Elle s'inscrit dans la recherche de l'efficacité maximale de l'unité de fertilisant apporté. Par exemple, pour la fonction « activité photosynthétique », on va trouver l'élément azote, mais aussi le magnésium, le fer, le manganèse ou le zinc. Une teneur un peu faible en azote, si elle est également accompagnée de niveaux un peu réduits en magnésium, fer ou manganèse, va avoir le même effet qu'un manque plus important en azote. Le conseil le plus efficace et le moins onéreux, ne sera pas forcément d'augmenter les apports d'azote.

De même, la nutrition du végétal est conditionnée par de nombreux phénomènes de synergie, interaction, compensation ou antagonisme (électriques, chimiques, physiologiques) dont la connaissance est nécessaire pour une bonne interprétation (voir exemple figure 2). Par exemple, un excès d'azote au début de printemps peut pénaliser les prélèvements du phosphore (antagonisme ionique), alors qu'une trop forte disponibilité azotée en fin de printemps va entraîner un niveau foliaire plus faible en calcium (maintien en phase juvénile) ou en potassium (blocage de la fonction reproductive).

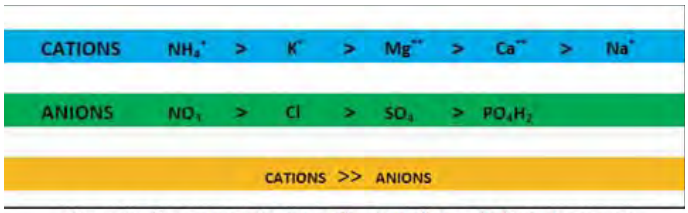



*Figure 2 : Classement des ions selon leur vitesse de franchissement des membranes cellulaires (d'après Martin-Prevel 1984)*

## UTILISER L'ANALYSE DE SOL

Une part significative de la variabilité des éléments dans l'analyse foliaire provient de la nature du sol et de ses réserves minérales et organiques. Pratiquement, l'analyse foliaire permet de vérifier la disponibilité de l'élément minéral présent au sol et l'efficacité de la fertilisation.

On s'aperçoit, par contre, que les conditions de prélèvement impactent plus les résultats des analyses foliaires que les teneurs minérales du sol. Ainsi, des teneurs foliaires conjointement réduites en azote, potassium, manganèse et/ou bore vont souvent indiquer des difficultés de régularité du flux hydrique dans le végétal alors que des teneurs limitées en phosphore, calcium et/ou magnésium traduisent souvent des difficultés racinaires (même si, dans tous les cas, il faut vérifier préalablement que ces éléments sont bien présents au sol).

De même, la lecture des concentrations foliaires en oligo-éléments ne peut se faire sans connaissance du pH du sol (blocage en sol alcalin et sur-assimilation du fer et manganèse en sol acide). A noter, le cas particulier du fer : cet élément migrant très peu dans le végétal n'est pas réutilisé en cas de déficit et sa carence peut s'exprimer très rapidement dans les organes en croissance, même si les résultats de l'analyse foliaire sur feuilles adultes, en fer total, sont cohérents. Une autre difficulté d'appréciation des niveaux foliaires en oligo-éléments est le fait que certains éléments apportés directement (produits minéraux foliaires) ou indirectement (traitements phytosanitaires) peuvent, malgré le lavage des feuilles, s'accumuler dans les premières couches cellulaires et amener des concentrations élevées, sans que l'on puisse parler de toxicité interne, puisqu'il n'y a pas eu de translocation.

L'analyse foliaire apparaît donc bien comme un outil complémentaire de l'analyse de sol, soit pour identifier un dysfonctionnement du végétal, soit pour valider un itinéraire technique. Son interprétation, multifactorielle, ne pourra être complète et source de décisions que si elle est confrontée à la réalité parcellaire.

Le Service Agronomie du LCA est à votre disposition pour toute information complémentaire. N'hésitez pas à nous contacter !

# ENGRAIS FOLIAIRES : MYTHE OU RÉALITÉ ?

*Publié le 16 décembre 2010*

Le plus difficile, lorsque l'on aborde le sujet de la nutrition minérale foliaire du végétal, est de faire la part entre les actes de foi et les connaissances scientifiques.

**On peut cependant essayer de classer les apports minéraux foliaires en trois groupes d'action :**

**- Action de Correction** : cela concerne surtout les oligo-éléments. Dans ce cas, la quantité de minéral apporté est pondéralement significative par rapport aux faibles besoins de la plante et l'on comprend que, même passivement, il puisse y avoir une efficacité. A noter que le fer est un des éléments dont la réponse est la plus faible quand il est apporté par voie foliaire.

**- Action Mécanique :** il ne s'agit pas ici d'une action de nutrition au sens strict. L'élément minéral apporté ne pénètre pas dans les voies nutritionnelles, mais, en saturant les tissus externes des organes, va avoir une action de protection, de régulation de la respiration ou de réorientation temporaire des flux nutritionnels. C'est dans ce groupe que l'on peut classer le calcium.

**- Action de Soutien** (de stimulation, de résistance aux stress, ...) : elle concerne essentiellement l'azote, avec possibilité d'intégration dans le végétal de certaines formes (surtout l'urée, en prenant garde à la toxicité des biurets). En période de reprise végétative ou de difficultés climatiques, cela aide à soutenir le végétal en maintenant son fonctionnement, voire en stimulant l'activité radiculaire.

## QUELQUES BASES DOIVENT ÊTRE RAPPELÉES

- La voie foliaire n'est pas un axe " normal " de nutrition. Que la pénétration se fasse par la cuticule, les stomates ou les trichomes, elle n'est jamais facile et donc jamais dénuée de risque d'agressivité vis-à-vis de la plante. Il n'existe pas de produit à innocuité totale.

- Pour optimiser l'efficacité, on ne mélange pas des éléments minéraux antagonistes (potassium et calcium ou magnésium et manganèse, par exemple). Les éléments apportés seuls sont toujours plus efficaces (à l'exception de l'azote qui favorise la pénétration et le transfert des autres éléments).

- Les apports foliaires ne se raisonnent pas en concentration. Au contraire, l'efficacité diminue rapidement quand la concentration de l'apport augmente (les risques de phytotoxicité augmentant également).

- Seules les feuilles adultes, mais non sénescentes, permettent la translocation (transfert vers les autres parties du végétal). Les feuilles jeunes sont consommatrices et ne permettent pas ce phénomène ; par contre, les engrais y pénètrent plus facilement.

- Les taux d'absorption et de transfert, s'il y a lieu, diffèrent sensiblement selon la forme chimique apportée. Les " sur-pénétrations " sont plus à craindre que la non efficacité.

- Certaines espèces réagissent de façon spécifique à tel ou tel élément minéral (maïs ou abricotier par exemple). Il est important de vérifier, avant emploi, que le produit a bien été testé sur la culture concernée.

Les apports minéraux foliaires ne remplacent pas la nutrition racinaire. Ils sont à considérer comme des outils complémentaires pour répondre à des situations particulières (tassement du sol, blocage de l'élément, stress climatique ou végétatif, ...).

Leur efficacité est liée à de très nombreux facteurs (humidité, température, luminosité, stade physiologique, formes chimiques, surfactants, mouillants, chélatants, ...) qui la rendent souvent imprévisible.

# NUTRITION : IL N'Y A PAS DE SECOND RÔLE

*Publié le 12 juin 2014*

Les végétaux chlorophylliens sont supérieurs à l'homme à de nombreux points de vue. Sans parler de leurs exceptionnelles adaptations à l'économie d'énergie, les plantes ont la capacité de produire des substances organiques à partir de composés minéraux, grâce à la photosynthèse. Cette nature de producteurs primaires, ou autotrophes les distingue de l'homme, des animaux et de nombreux micro-organismes qui ont besoin d'un apport externe d'aliments organiques. Chez les animaux, les aliments sont à la fois des matériaux de construction de leur propre matière et leur unique source d'énergie. Chez les végétaux chlorophylliens, par contre, les aliments puisés dans le milieu extérieur sont des matériaux de construction mais ne constituent pas directement leur source d'énergie. Cet Agro Reporter fait le point sur les éléments minéraux nécessaires à la plante cultivée, en s'intéressant plus spécialement aux oligo-éléments selon une approche fonctionnelle.

## Qui est indispensable ?

Pour le physiologiste, trois critères sont nécessaires pour qu'un élément minéral soit dit indispensable à la plante (Arnon et Stout 1939) :
- une déficience de l'élément considéré ne permet pas à la plante d'accomplir un cycle complet (végétatif et reproductif),
- la déficience de cet élément et les symptômes spécifiques correspondants ne peuvent être corrigés que par l'apport de l'élément en question,
- cet élément est directement impliqué dans la nutrition de la plante, indépendamment d'un effet possible sur les conditions chimiques ou microbiologiques dans le sol ou le milieu.

Comme pour toute règle, ces critères sont souvent considérés comme trop rigide. Pour quelques espèces, le vanadium, par exemple, peut se substituer complètement au molybdène. Le tableau 1 liste les éléments minéraux actuellement connus pour être indispensables à la plante supérieure.

| | | | Teneur (ppm MS) |
|---|---|---|---|
| Eléments Organiques | Carbone | C | 454 000 |
| | Oxygène | O | 410 000 |
| | Hydrogène | H | 55 000 |
| Macro-éléments | Azote | N | 30 000 |
| | Calcium | Ca | 18 000 |
| | Potassium | K | 14 000 |
| | Soufre | S | 3 400 |
| | Magnésium | Mg | 3 200 |
| | Phosphore | P | 2 300 |
| Micro-éléments | Manganèse | Mn | 630 |
| | Zinc | Zn | 160 |
| | Fer | Fe | 140 |
| | Bore | B | 50 |
| | Cuivre | Cu | 14 |
| | Molybdène | Mo | 0,9 |
| | Chlore | Cl | 2 000 |
| | (Sodium) | Na | 1 200 |
| | (Silicium) | Si | 200 |
| | (Cobalt) | Co | 0,5 |

*Tableau 1 - Liste des éléments minéraux indispensables et exemple de teneurs dans le végétal (de H.J.M. BOWEN, 1966, pour des plantes forestières majoritairement angiospermes)*

Le Chlore est l'élément le plus récemment ajouté à la liste des éléments minéraux indispensables à toutes les plantes supérieures (Broyer end and al. 1954). Le sodium et le silicium ne sont pas indispensables à toutes les plantes et ne font donc pas partie de la liste « officielle » mais sont nécessaires, respectivement, pour les plantes de type photosynthétique C4 (maïs, sorgho, canne à sucre) et pour le riz. Le cobalt est à la frontière entre le monde animal et végétal puisqu'il est nécessaire à la bactérie Rhizobium, présente dans les nodosités des racines de légumineuse et permettant l'assimilation d'azote gazeux. Les travaux sur la rhizosphère et sur les échanges entre la plante et les micro-organismes vont certainement faire encore évoluer ce classement.

Un élément minéral peut ne pas être indispensable, en tant que tel, au végétal, mais lui apporter un effet positif. Par exemple, BOLLARD et BUTLER (1966) ont montré que le rendement des betteraves pouvait être augmenté par apport de sodium. Des apports de silice peuvent avoir un effet intéressant pour certaines espèces, notamment en termes de résistance aux stress climatiques, mais on est alors plus sur un effet mécanique que strictement nutritionnel.

En cultures fourragères ou alimentaires, il peut être intéressant d'apporter à la plante des éléments nécessaires à l'animal qui les trouve ainsi dans sa ration. Des teneurs suffisantes (mais sans excès) en iode, sélénium ou fluor peuvent être des critères de qualité d'un fourrage, mais sans que ces éléments ne soient nécessaires au végétal.

## Macro ou micro ?

Les éléments minéraux sont généralement classés en macro-éléments dont la plante a besoin en forte quantité et en micro-éléments (voir tableau 1). Ces derniers sont appelés oligo-éléments en France (Bertrand, 1903) et autrefois éléments traces.
Cette approche quantitative n'a pas de sens physiologique ; pour la plante, c'est toujours l'élément déficient qui aura le plus d'importance. Cela explique pourquoi la classification en élément mineur ou majeur n'est plus utilisée.
Par ailleurs, ces besoins vont varier considérablement d'une espèce à l'autre et la frontière entre macro et micro éléments n'est pas d'une grande évidence (Y. COIC et M. COPPENET 1989). Ainsi, dans l'exemple du tableau 2, les écarts des besoins relatifs entre le fer et le molybdène sont plus élevés qu'entre le phosphore et le fer.

*Tableau 2 - Besoins en macro et micro-éléments pour diverses cultures annuelles (Y. COIC et M. Coppenet 1989)*

| | | | |
|---|---|---|---|
| Macro-éléments | Azote | N | 100 - 300 kg/ha |
| | Potassium | K | 100 - 400 kg/ha |
| | Calcium | Ca | 40 - 200 kg/ha |
| | Phosphore | P | 20 - 50 kg/ha |
| | Soufre | S | 10 - 40 kg/ha |
| | Magnésium | Mg | 10 - 30 kg/ha |
| Micro-éléments | Fer | Fe | 1000 - 2000 g/ha |
| | Manganèse | Mn | 150 - 700 g/ha |
| | Zinc | Zn | 100 - 300 g/ha |
| | Bore | B | 80 - 200 g/ha |
| | Cuivre | Cu | 25 - 100 g/ha |
| | Molybdène | Mo | 5 - 20 g/ha |

(...)

(...)

## Classement fonctionnel

Le physiologiste préfère des classements basés sur le comportement biochimique et physiologique de l'élément minéral, plus adapté à une vision dynamique de la nutrition. J. NICHOLAS (1961) raisonne sur les notions d'élément fonctionnel ou physiologique. C'est ce que proposent également K. MENGEL et E.A. KIRKBY (1987) dans le tableau 3 en regroupant les éléments par identité de comportement biochimique.

| GROUPE | | | Prélèvement | Fonction Biochimique |
|---|---|---|---|---|
| 1 | Carbone | C | Sous forme de $CO_2$, $HCO_3^-$, $H_2O$, $O_2$, $NO_3^-$, $NH_4^+$, $N_2$, $SO_4^{--}$, $SO_2$. Les ions à partir de la solution du sol, les gaz de l'atmosphère | *Principaux constituants de la matière organique. *Implication dans les processus enzymatiques. *Assimilation par oxydo-réduction. |
| | Hydrogène | H | | |
| | Oxygène | O | | |
| | Azote | N | | |
| | Soufre | S | | |
| 2 | Phosphore | P | Sous forme de phosphates, acide borique ou borates et silicates, à partir de la solution du sol | *Estérification avec des groupes alcool. *Les esters de phosphates sont impliqués dans les réactions de transfert énergetique. |
| | Bore | B | | |
| | Silicium | Si | | |
| 3 | Potassium | K | Sous formes d'ions à partir de la solution du sol. | *Fonctions non spécifiques sur le potentiel osmotique. *Réactions plus spécifiques sur les activations enzymatiques. *Pontages réactionnels. *Balance anionique. *Contrôle de la perméabilité menbranaire et des potentiels electriques. |
| | Sodium | Na | | |
| | Magnésium | Mg | | |
| | Calcium | Ca | | |
| | Manganèse | Mn | | |
| | Chlore | Cl | | |
| 4 | Fer | Fe | Sous forme d'ions ou de chelates à partir de la solution du sol | *Majoritairement présents sous forme chélatée dans les groupes prosthétiques (non protéiques). *Permettent le transport d'électron par changement de valence. |
| | Cuivre | Cu | | |
| | Zinc | Zn | | |
| | Molybdène | Mo | | |

*Tableau 3 – classement fonctionnel des éléments (K. MENGEL et E.A. KIRKBY, 1987)*

## Groupes fonctionnels

En prolongement du classement fonctionnel des éléments minéraux, une autre approche consiste à regrouper les éléments minéraux qui interviennent sur les mêmes fonctions et à inverser la démarche en partant d'une observation de terrain.
Par exemple, face à un végétal chlorosé montrant un trouble de la photosynthèse d'ordre minéral, il est intéressant de réfléchir aux éléments minéraux impliqués directement dans la photosynthèse : l'azote, le soufre, le magnésium, le fer, le manganèse, le potassium et le zinc. Ces éléments constituent le groupe fonctionnel « photosynthèse ».
En effet, en nutrition, un élément minéral n'est jamais indépendant des autres. Par exemple, corriger un manque de fer par des apports spécifiques sur un végétal en le laissant manquer d'azote ou de magnésium aura très peu d'impact.
De même, dans les problèmes de coulures ou de chutes physiologiques en plantes pérennes, il est toujours tentant de penser directement au bore ou au zinc, alors que l'azote (en manque, en excès ou en déséquilibre avec le potassium), le phosphore (dans son équilibre avec l'azote) ou le calcium sont, dans la majorité des cas, beaucoup plus explicatifs des problèmes observés.
Il en est de même pour les problèmes physiologiques liés au calcium (pommes, melons, pommes de terre…) où le zinc, le bore (en déficit ou en excès) ou des excès de potassium, magnésium ou azote ne permettront pas au calcium, même s'il est potentiellement présent, de structurer les cellules des organes.

En parallèle de cette approche, et avant toute action, il sera nécessaire également de réfléchir aux origines réelles du problème observé : déficit, déséquilibres ou blocages au sol, évènements climatiques, difficultés radiculaires, déséquilibre végétatif…. Le problème est-il évènementiel ou récurrent ?
Après ces étapes et avec l'aide des différentes sources d'informations disponibles (observations du végétal, résultats techniques, informations parcellaires, analyse de sol et de végétal…), l'agronome pourra alors proposer des solutions à court terme (apport spécifique) et à moyen terme (amélioration des conditions de milieu).
(...)

*Chlorose par manque d'azote, de fer, de soufre, de manganèse, de potassium, de magnésium, de zinc ou de glucides ?*

(...)

**démarche de gestion de la nutrition en bore et zinc.**

## 1 - Démarche

Le schéma ci-dessous montre la démarche à appliquer pour réfléchir, s'il y a lieu, à une stratégie d'apport en bore et zinc.

L'ESPECE cultivée est-elle sensible ? => voir tableau 1
Le SOL est-il correctement pourvu ? => voir tableau 2
Quels sont les risques de BLOCAGE au sol ? => voir tableau 3
Le CLIMAT accentue t-il les risques ? => voir tableau 4
L'ETAT VEGETATIF accentue t-il les risques ? => voir tableau 5
La NUTRITION est-elle équilibrée ? => voir tableau 6
Y a-t-il des SYMPTOMES ? => voir tableaux 7 et 8

## 2 - Quelles sont les espèces les plus sensibles ?

Le tableau 1 fait une synthèse des espèces référencées comme les plus sensibles au manque ou à la carence en bore et zinc. A noter que le terme de carence sous-entend la présence de symptômes, alors qu'en cas de manque (déficience) il peut y avoir un effet dépressif sur le végétal (croissance, rendement, qualité...) sans expression visuelle.

Il serait possible, surtout pour les plantes pérennes, de préciser la sensibilité de telle variété (par exemple le pommier braeburn très sensible au manque de zinc) ou cépage (par exemple le cépage grenache très sensible au manque de bore).

D'une façon générale, moins la production de l'espèce ou de la variété est stable et régulière, plus elle sera sensible au manque de bore et zinc. De même, plus elle sera déséquilibrée végétativement, plus elle sera sensible au manque en ces deux éléments.

| | BORE | ZINC |
|---|---|---|
| ARBORICULTURE | X | X |
| VITICULTURE | | |
| Raisin de table | X | X |
| Raisin de cuve | X | |
| MARAICHAGE | | |
| Asperge | X | |
| Choux | X | |
| Haricot | | X |
| Melon | | X |
| Tomate | X | X |
| GRANDES CULTURES | | |
| Betterave | X | |
| Céréales | | X |
| Colza | X | |
| Coton | X | |
| Lin | | X |
| Luzerne | X | |
| Maïs | | X |
| Pommes de Terre | X | X |
| Soja | | X |
| Tournesol | X | |
| Sorgho | | X |

*Tableau 1 – Sensibilité des cultures au manque de bore et zinc*

## 3 - Facteurs de sensibilité liés au sol

Comme pour tout élément, deux questions sont à se poser :
- Le bore et le zinc sont-ils présents au sol ?
- Si oui, sont-ils disponibles ?

Les analyses de terre tiennent compte de ces deux points en indiquant les teneurs minimales souhaitables par type de sol et par culture : voir exemple tableau 2. Elles indiquent également les seuils de toxicité pour ces deux éléments dont l'emploi peut être risqué, du fait d'une plage assez étroite entre le seuil souhaitable et le seuil de toxicité, surtout pour le bore. Elles se basent sur des extractions spécifiques, à l'acétate d'ammonium en présence d'un agent chélatant (EDTA) pour le zinc ou à l'eau bouillante pour le bore par exemple. Ces méthodes d'extraction sont normalisées : pour plus d'information voir WikiLCA sur le zinc ou le bore. Les valeurs trouvées sont très faibles par rapport aux concentrations totales de ces éléments dans les sols, mais ce sont les seules valeurs interprétables par l'agronome.

| | BORE | ZINC |
|---|---|---|
| Grandes Cultures | 0,2 à 0,3 | 2 à 2,5 |
| Plantes Pérennes | 0,1 à 0,2 | 1 à 2 |
| Maraichage | 0,3 à 0,4 | 2 à 3 |

*Tableau 2 – Plages de teneurs minimales souhaitables en bore extrait à l'eau chaude (NF X31-122) et zinc EDTA (NF X31-120) en mg/kg de terre, en fonction des cultures*

Le tableau 3 liste les contraintes physiques, chimiques ou biologiques des sols pénalisant la disponibilité du bore et du zinc.

| | BORE | ZINC |
|---|---|---|
| PH élevé | X | X |
| Surchaulage | X | X |
| Réchauffement difficile | | X |
| Manque de porosité | | X |
| Faible Activité Biologique | | X |
| Pauvre en Matières Organiques | X | |
| Très aéré, texture grossière | X | X |
| Faible Réserve Utile en eau | X | |
| Sol humide | | X |
| Sol acide lessivé | X | |
| Sol tourbeux acide | | X |
| Excès de P2O5 | | X |
| Excès de K2O | X | |
| Excès de CaO | X | X |
| Excès de MgO | X | X |
| Excès de Na2O | X | X |
| Excès de Cuivre | X | X |
| Excès de Fer | | X |

*Tableau 3 – Facteurs de blocage et de déficience en bore et zinc liés aux caractéristiques du sol*

## 4 - Facteurs de sensibilité liés au climat

D'une façon générale, l'assimilation du zinc (en grande partie sous contrôle métabolique) sera pénalisée en conditions peu poussantes au printemps en lien avec des températures basses, alors que celle du bore sera pénalisée en conditions sèches ou venteuses ne permettant pas une bonne régularité du flux hydrique dans le végétal. L'absorption du bore est en effet très liée au flux hydrique à travers la racine. A noter également les risques de lessivage du sol en bore en cas d'excès d'eau, cet élément pouvant se trouver sous la forme d'acide borique (facilement lessivable) dans la solution du sol.

| | BORE | ZINC |
|---|---|---|
| Sécheresse | X | |
| Vent | X | |
| Forte pluviométrie | X | X |
| Forte intensité lumineuse | X | |
| Faible luminosité | X | X |
| Printemps froid | | X |

*Tableau 4 – Facteurs de blocage et de déficience en bore et zinc liés au climat*

(...)

## 5 – Facteurs de sensibilité lié à l'état végétatif

Les fortes vigueurs (par des phénomènes de dilution), les faibles vigueurs et les déséquilibres végétatifs / fructifères pénalisent l'assimilation du bore ou du zinc (voir tableau 5).

| | BORE | ZINC |
|---|---|---|
| Forte Vigueur | | X |
| Faible vigueur | X | X |
| Système racinaire dégradé | X | X |
| Excès de charge ou rendement | X | |
| Manque de charge ou rendement | | X |

*Tableau 5 – Facteurs de blocage et de déficience en bore et zinc liés à l'état végétatif*

## 6 – Relations du bore et du zinc avec les autres éléments minéraux

Le tableau 6 présente les éléments minéraux dont l'excès ou le déficit dans le végétal vont pénaliser la fonctionnalité interne du bore et du zinc. On s'aperçoit que, comme pour le sol et sauf pour l'azote, il s'agit surtout d'antagonismes ioniques.

| | BORE | ZINC |
|---|---|---|
| Manque d'Azote | | X |
| Excès d'Azote | X | |
| Excès de Potassium | X | X |
| Excès de Magnésium | X | X |
| Excès de Fer | X | X |
| Excès de Manganèse | X | |

*Tableau 6 – Eléments minéraux pénalisant la fonctionnalité du bore et zinc dans le végétal*

## 7 - Quels sont les symptômes ?

Les symptômes de déficience ou carence en bore et zinc découlent directement de leur fonction dans le végétal (voir tableaux 7 et 8).

| | BORE | ZINC |
|---|---|---|
| Croissance organes jeunes | X | X |
| Chlorophylle | | X |
| Protéines | X | X |
| Acides nucléiques | X | X |
| Nouaison | | X |
| Floraison, Pollinisation | X | |
| Transfert des sucres | X | |
| Régulation des sucres | X | |
| Résistance sécheresse | X | |

*Tableau 7 – Synthèse des rôles du bore et zinc*

| | BORE | ZINC |
|---|---|---|
| Blanchiment des jeunes feuilles | | X |
| Jaunissement des jeunes feuilles | X | |
| Chloroses internervaires | | X |
| Atrophies et empilements foliaires | | X |
| Déformations foliaires | X | |
| Mortalités bourgeons | X | |
| Taches sur feuilles | X | |
| Manque de production | X | X |
| Manque de calcium (fruits, baies, tubercules..) | X | X |
| Manque de phosphore dans les organes | | X |
| Proliférations cellulaires, éclatements | X | |

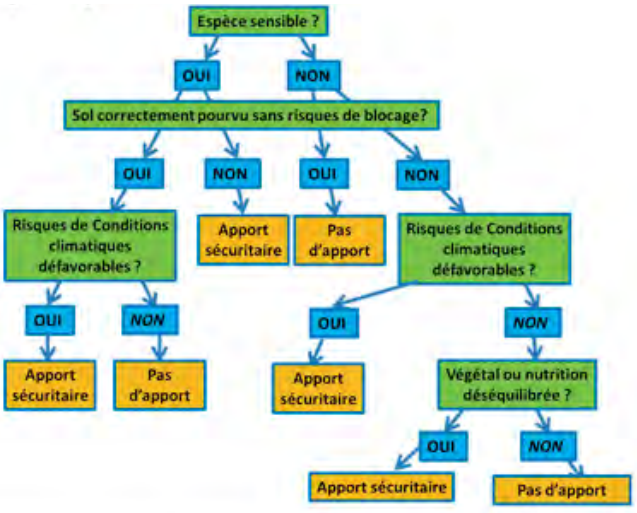
*Tableau 8 – Quelque symptômes du manque de bore ou zinc.*

Le zinc appartenant au groupe fonctionnel « vigueur, croissance » va intervenir plus nettement que le bore sur l'état végétatif. A l'inverse, un manque de bore va marquer plus rapidement la fertilité des cultures et l'aspect qualitatif de la production. Par contre, tous deux, avec une action différente, vont jouer sur le niveau de la production (floraison, pollinisation ou nouaison). Sur les espèces ou variétés fragiles (arboriculture notamment), des apports en bore et zinc sont souvent préconisés pour améliorer la capacité de la plante à résister à toute séquence climatique difficile pendant ces phases reproductives.

A noter également que le zinc et le bore sont étroitement liés à la physiologique du calcium. Ainsi, sur cultures sensibles aux désordres liés au calcium (melon, pommes de terre, pommiers, tomates...), un soutien spécifique en ces deux éléments est souvent conseillé si elles sont pratiquées sur des sols où le calcium est peu disponible. De ce fait, on trouve assez fréquemment des relations entre le zinc et le bore et certains maladies ou parasites dans la mesure où leur déficit pénalise la structure des organes et leur capacité à résister à toute agression extérieure.

En dehors des carence au sens strict où les symptômes peuvent être assez caractéristiques et justifier alors un apport (toujours en foliaire dans ce cas-là) avant une approche analytique, il est prudent de toujours vérifier par une analyse du végétal des soupçons de déficience en zinc ou bore avant d'appliquer une stratégie d'apport soutenue (hors entretien). En effet, ces deux éléments ont la caractéristique commune d'être rapidement toxiques dès qu'ils sont en excès. Pour les mêmes raisons, l'apport au sol sera effectué avec beaucoup de prudence, surtout en plantes pérennes.
De même, sauf pour cultures sensibles, la présence de symptômes non spécifiques ne suffit pas pour justifier d'un apport de bore ou zinc. La décision doit être confortée par une analyse de sol ou de végétal.

La figure ci-dessous présente un arbre de décision pour les apports de bore et zinc en l'absence de symptômes sur le végétal (apport sécuritaire). En effet, l'innocuité totale d'un apport en un de ces deux éléments, qu'il soit effectué au sol ou, surtout, par voie foliaire, n'existant pas, il est important de le raisonner.




*Arbre de décision pour un apport sécuritaire (sans symptôme sur le végétal) en bore ou zinc*

# AMENDEMENT ORGANIQUE ET SUPPORTS DE CULTURE

L'AGRO reporter

EDITION COMPLETE

# QU'AVEZ-VOUS À DÉCLARER ? LES NOUVELLES RÈGLES DU JEU

*Publié le 1 décembre 2011*

La réglementation des plateformes de compostage a connu une nouvelle évolution cet été. Elle concerne les installations soumises à déclaration sous la rubrique n°2780 : « Installations de compostage de déchets non dangereux ou matière végétale brute ayant le cas échéant subi une étape de méthanisation ». Suite à la parution au Journal Officiel le 6 août dernier, d'un arrêté du 12 juillet 2011, ces installations vont être soumises à de nouvelles prescriptions. Celles-ci sont détaillées dans l'Annexe I du texte. Cet arrêté abroge l'arrêté du 7 janvier 2002 relatif aux prescriptions générales applicables aux Installations Classées pour la Protection de l'Environnement (ICPE) soumises à déclaration sous la rubrique n°2170 (fabrication de matières fertilisantes) et mettant en œuvre un procédé de transformation biologique aérobie (compostage) des matières organiques.

**Quelles sont les évolutions majeures liées à ce nouveau texte ?**

Il souligne que la destination première de l'installation est la production d'une matière fertilisante ou d'un support de culture homologué ou conforme à une norme d'application obligatoire. Cette idée constitue un « fil rouge » du texte. Sont aussi largement développés les aspects traçabilité et réduction des nuisances (rejets, bruits, odeurs). Voici les principaux changements apportés.

## DE NOUVELLES DÉFINITIONS

Cet arrêté apporte une définition précise de certains termes : andain, concentration et débit d'odeur, retour au sol. Ce dernier est décrit comme un usage de fertilisation des sols et regroupe le cas des composts mis sur le marché et celui des matières épandues sur terrain agricole dans le cadre d'un plan d'épandage. Les matières produites par l'installation sont ainsi de deux types :

> **Les produits finis :** conformes à une norme rendue d'application obligatoire (NDLR : NF U44-051, NF U44-095, NF U44-551, NF U42-001 ...) ou bénéficiant d'une homologation, d'une autorisation provisoire de vente ou d'une autorisation de dis tribution pour expérimentation ;

> **Les déchets,** qui regroupent deux types de matières :
- Les matières intermédiaires, destinées à être utilisées comme matière première dans une autre ICPE en vue de la production de produits finis normalisés ou homologués ;
- Les autres déchets et effluents

## RÈGLES D'EXPLOITATION

**Lot et traçabilité** :
après avoir défini la notion de « lot (1) », l'arrêté insiste sur un allotement des produits finis destinés à un retour au sol, afin d'en assurer la traçabilité. Parallèlement il précise que l'exploitant doit tenir à jour un document de suivi des lots. Il doit y reporter les résultats d'analyses nécessaires à la démonstration de la conformité du lot de compost sortant aux critères définissant une matière fertilisante. Ce document est conservé au moins pendant 10 ans et doit être communiqué à tout utilisateur des matières produites qui en ferait la demande.

**Matières premières autorisées :**
alors que l'arrêté du 7 janvier 2002 listait les matières entrantes autorisées, celui du 12 juillet 2011 décrit les déchets interdits en tant que matière première. Toute admission envisagée par l'exploitant de matières à composter d'une nature ou d'une origine différentes de celles mentionnées dans le dossier de déclaration doit être portée à la connaissance du Préfet. Selon l'Article 3.5.1 du dernier arrêté, sont interdits :

> Les boues dont la concentration en polluants dépasse les valeurs limites prévues par l'arrêté du 8 janvier 1998 (2) ;

> Les déchets dangereux au sens de l'article R.541-8 du code de l'environnement ;
> Les sous-produits animaux de catégorie 1 tels que définis à l'article 8 du règlement (CE) n°1069/2009 ;

> Les déchets contenant un ou plusieurs radionucléides dont l'activité ou la concentration ne peut être négligée du point de vue de la radioprotection.

**Registres :**
la durée de conservation du registre des entrées est réduite. Ce document doit dorénavant être conservé 3 ans, au lieu de 10 ans dans l'arrêté de 2002. Par contre la durée de conservation du registre des sorties de produits est inchangée (10 ans).

Comme dans le précédent arrêté, l'exploitant doit conserver l'information préalable sur les matières entrantes du fournisseur (3) . La durée de conservation de ce document par l'exploitant passe de 2 ans à 3 ans.

Durées de conservation des documents d'enregistrements :

**Normes de transformation :**
l'annexe II de l'arrêté précise des normes de transformation. Elles ne s'appliquent pas aux installations mettant en œuvre un procédé de lombricompostage. Ces normes se caractérisent par la définition de :

> Couples « temps x température », assortis des conditions opératoires pour la mesure des températures ;

> Durées minimales de fermentation

> Nombres minimaux et espacement des retournements

***Extrait de l'annexe II :***

| Type de document | Arrêté du 12 juillet 2011 | *Arrêté du 7 janvier 2002* |
|---|---|---|
| Information préalable du fournisseur | 3 ans | *2 ans* |
| Registre des entrées | 3 ans | *10 ans* |
| Registre des sorties | 10 ans | *10 ans* |

***NDLR : le respect de ces conditions doit permettre d'obtenir l'hygiénisation du produit, mais il n'est pas une garantie de conformité à une norme pour les autres critères, d'ordre agronomique ou sanitaire (ETM).***

| Procédé | Process |
|---|---|
| Compostage avec aération par retournements | 3 semaines de fermentation aérobie au minimum<br>Au moins 3 retournements espacés d'au moins 3 jours<br>55°C au moins pendant une durée minimale totale de 72 heures. |
| Compostage en aération forcée | 2 semaines de fermentation aérobie au minimum<br>Au moins 1 retournement (opération de retournement après fermentation aérobie suivie d'une remontée de température à 50°C pendant 24 heures)<br>55°C au moins pendant une durée minimale totale de 72 heures |

[...]

[...]

## DE NOUVEAUX CRITÈRES À RESPECTER POUR LE RETOUR AU SOL

**Produits finis :**
l'arrêté du 12 juillet 2011 impose une obligation de résultat sur la qualité du produit fini. En effet il fixe à 10% par an au maximum, la quantité produite de compost non-conforme au cahier des charges « matière fertilisante » (norme NF ou dossier d'homologation)

**Produits intermédiaires :**
les critères de qualité se durcissent. Ceci représente une évolution majeure de ce texte. Dorénavant, on impose à ces matières de respecter les critères d'innocuité de la norme NF U44-051 (2006), alors que l'arrêté du 7 janvier 2002 faisait référence aux critères de l'arrêté du 8 janvier 1998 pour ces mêmes produits intermédiaires. Par conséquent les valeurs limites à respecter se trouvent divisées par un facteur de 3 à 8 selon les éléments traces métalliques. Des valeurs limites apparaissent pour l'arsenic et le sélénium totaux ainsi que pour les éléments indésirables (4) (plastique, verre, métaux, ...). Par contre les critères sur les PCB (Polychlorobiphényles) disparaissent. Les concentrations à respecter en HAP (Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques) restent inchangées. Ainsi les installations soumises à déclaration se voient imposer les mêmes critères de qualité des matières intermédiaires que les ICPE soumises au régime d'autorisation (arrêté du 22 avril 2008).

Evolution des critères sur les produits intermédiaires :

| Elément total en mg / kg de matière sèche | | Arrêté du 12 juillet 2011 | Arrêté du 7 janvier 2002 |
|---|---|---|---|
| ELEMENTS METALLIQUES TRACES | Cadmium (Cd) | 3 | 10 |
| | Chrome (Cr) | 120 | 1 000 |
| | Cuivre (Cu) | 300 | 1 000 |
| | Mercure (Hg) | 2 | 10 |
| | Nickel (Ni) | 60 | 200 |
| | Plomb (Pb) | 180 | 800 |
| | Zinc (Zn) | 600 | 3 000 |
| | Cr + Cu + Ni + Zn | - | 4 000 |
| | Arsenic (As) | 18 | - |
| | Sélénium (Se) | 12 | - |
| HAP | Fluoranthène | 4 | 4 ou 5 selon culture |
| | Benzo(b)fluoranthène | 2.5 | 2.5 |
| | Benzo(a)pyrène | 1.5 | 1.5 ou 2 selon culture |
| SOMME DE 7 PCB | | - | 0.8 |
| INDESIRABLES (plastique, verre, métaux, ...) (4) | | Films et PSE sup à 5 mm < 0,3% MS<br>Verre et métaux sup à 2 mm < 2% MS<br>Plastiques durs et textiles sup à 5 mm < 0,8% MS | - |

**Epandage des déchets :**
celui-ci se fait dans le cadre d'un plan d'épandage. Dans l'article 5.10.c de ce nouveau texte, les préconisations concernant les apports d'azote par les déchets sont renforcées et précisées : prise en compte de la capacité exportatrice des cultures, de la nature du sol et des rotations culturales, interdiction d'épandage sur certaines cultures....

## REJETS LIQUIDES

Les conditions de prélèvements d'eau et de rejets liés au fonctionnement de l'installation doivent être compatibles avec les objectifs du Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SDAGE). L'arrêté du 12 juillet 2011 modifie les suivis à réaliser sur les rejets liquides :

- ***De nouvelles informations à enregistrer :*** les consommations annuelles d'eau permettent d'estimer les volumes des rejets.

***- Allègement des critères de rejet et modifications*** :

> Les installations, dont le rejet dans un réseau public équipé d'une station d'épuration ne dépasse pas 15 kg/j de MESt, ni 15 kg/j de DBO5, ni 45 kg/j de DCO, ne sont plus soumises à des valeurs limites de rejet ;

> Dans les autres situations, les normes de rejet sont inchangées pour les critères MES, DCO et DBO5. Par contre, les anciens critères portant sur l'azote et le phosphore totaux ne s'appliquent plus dans la nouvelle version de l'arrêté.

> Les polluants de type ETM (Pb, Cr, Cu, Zn) et hydrocarbures totaux ne font plus l'objet de valeurs limites de rejet.

> A contrario, les normes de rejet sont plus restrictives dans le cas d'un rejet dans le milieu naturel ou dans un réseau dépourvu de station d'épuration, pour les flux journaliers de MES, DCO ou DBO5 dépassant certaines valeurs fixées par l'arrêté.

***A noter** : Les analyses se font toujours après traitement (si besoin), sur l'effluent brut non décanté et non filtré. En revanche les conditions de prélèvement ont été modifiées : un prélèvement continu asservi au temps sur ½ heure, ou deux prélèvements instantanés espacés de ½ heure. Le laboratoire qui réalise les analyses doit avoir obtenu l'agrément du Ministère de l'Environnement*

## ODEURS ET BRUIT

Cet arrêté ne modifie pas les préconisations sur le bruit. En revanche il précise la méthode de mesure à utiliser pour évaluer les odeurs, ainsi que les valeurs limites. Il indique que celles-ci s'appliquent dans un rayon de 3 000 mètres autour de la source. L'intensité des émissions odorantes doit être considérée comme « faible » (selon la norme) à cette distance.

Enfin, l'exploitant doit tenir un registre des plaintes, identifier les causes des nuisances, décrire les mesures mises en place pour en prévenir le renouvellement. Si un comité de riverain a été constitué, l'exploitant présente annuellement les mesures correctives qu'il a mises en œuvre.

## DÉLAIS D'APPLICATION

En fonction des articles et de la préexistence de l'installation au moment de la publication de l'arrêté, les délais d'application varient de 4 mois à 1 an après la date de publication au Journal Officiel du 6 août 2011.

*(1) Lot : au sens de l'arrêté du 12 juillet 2011, « quantité de produits fabriquée dans un seul établissement, sur un même site de production en utilisant des paramètres de production uniformes et qui est identifiée de façon à en permettre le rappel ou le retraitement si nécessaire".*

*(2) Arrêté du 08/01/98 fixant les prescriptions techniques applicables aux épandages de boues sur les sols agricoles pris en application du décret n° 97-1133 du 08/12/97 relatif à l'épandage des boues issues du traitement des eaux usées.*

*(3) Sauf installations connexes d'un élevage, compostant ses propres effluents.*

*(4) Dans le cas où la fabrication du produit fini ne prévoit pas d'étape d'élimination de ces éléments indésirables*

# VOL ICPE 2780 : ENREGISTREMENT EN COURS

*Publication du 24 janvier 2013*

Après l'autorisation et la déclaration, voici l'enregistrement ! Dernier né des régimes applicables à certaines installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE), dont les plateformes de compostage relevant de la rubrique n°2780, il nous rappelle que la réglementation évolue régulièrement pour ces installations. Quels changements ce nouveau régime apporte t'il ? Qu'elles sont les conséquences pour les exploitants des plateformes de compostage, nouvelles ou existantes ?

## LA RUBRIQUE N°2780 DES ICPE ET SES DIFFÉRENTS RÉGIMES

Depuis la publication du *Décret n°2009-1341 du 29 octobre 2009* modifiant la nomenclature des ICPE, les installations de compostage de déchets non dangereux ou matière végétale brute possèdent une rubrique spécifique, enregistrée sous le numéro 2780.

Cette rubrique désigne :

« Les installations de traitement aérobie (compostage ou stabilisation aérobie) de déchets non dangereux ou matière végétale brute, ayant le cas échéant subi une étape de méthanisation :

- compostage de matière végétale brute, effluents d'élevage, matières stercoraires ;
- compostage de la fraction fermentescible des ordures ménagères (FFOM), de denrées végétales déclassées, de rebuts de fabrication de denrées alimentaires végétales, de boues de stations d'épuration des eaux urbaines, de papeteries, d'industries agroalimentaires, seuls ou en mélange avec des déchets végétaux ou des effluents d'élevages ou des matières stercoraires ;
- compostage d'autres déchets ou stabilisation biologique.».

Selon ce texte, elles peuvent relever d'un régime d'autorisation ou de déclaration en fonction des quantités traitées. Ainsi, pour les installations qui compostent des matières végétales brutes, des effluents d'élevage ou des matières stercoraires, selon que les quantités traitées sont inférieures ou supérieures à 30 t/j, l'installation est classée respectivement sous le régime de déclaration ou d'autorisation. Dans le cas du compostage de la FFOM, de denrées végétales ou de boues, ce seuil est de 20 t/j.

Les règles auxquelles sont soumis les exploitants des ICPE classées sous la rubrique n°2780 sont fixées par arrêté :

- **Régime de déclaration :** *Arrêté du 12/07/2011* relatif aux prescriptions générales applicables aux installations classées soumises à déclaration sous la rubrique n°2780. L'article AgroReporter paru le 1er décembre 2011 *« Qu'avez-vous à déclarer ? les nouvelles règles du jeu »* développe les évolutions majeures liée à la publication de ce texte.
- **Régime de l'autorisation :** *Arrêté du 22/04/2008*, modifié par un *arrêté du 27/07/2012*, fixant les règles techniques auxquelles doivent satisfaire les installations de compostage ou de stabilisation aérobies soumises à autorisation en application du titre Ier du livre V du code de l'environnement.

Depuis la publication d'un nouveau *décret le 20 mars 2012* (Décret n°2012-384) et de son *rectificatif du 26 mai 2012*, un autre régime est créé pour les installations relevant de la rubrique n°2780 : le régime de l'enregistrement.

## DÉCRET N°2012-384 DU 20 MARS 2012

Ce nouveau décret du 20 mars 2012 ajoute un régime supplémentaire, l'enregistrement, qui vient se placer entre les deux régimes préexistants de déclaration et d'autorisation. Il conduit ainsi à redéfinir les seuils de passage d'un régime à l'autre basés sur les quantités moyennes traitées, en réservant le régime d'autorisation aux installations traitant au moins 50 t/j .

*Régime des ICPCE de la rubrique n°2780 traiatnt des matières végétales, dechets végètaux, effluents d'élevage, matières stercoraires. Modifications apportées par le décret du 20/03/2012 par rapport au décret du 29/10/2009.*

| Quantité traitée en tonne / jour | ≥ 3 à < 30 | ≥ 30 à < 50 | ≥ 50 |
|---|---|---|---|
| Régimes du Décret n°2009-1341 du 29/10/2009 | D | A | |
| Régimes du Décret n°2012-384 du 20/03/2012 & Rectificatif du 26/05/2012 | D | E | A |

Pour la rubrique n°2780, seules les installations de compostage traitant des matières végétales brutes, des effluents d'élevage et/ou des matières stercoraires peuvent relever du régime d'enregistrement. Les plateformes de compostage de FFOM ou d'autres déchets ne peuvent pas être classées sous un régime d'enregistrement. Ces dernières conservent les mêmes seuils de déclaration et d'autorisation.

## PARTICULARITÉS DES ICPE SOUS LA RUBRIQUE N°2780 RELEVANT DU RÉGIME DE L'ENREGISTREMENT

Les prescriptions générales applicables aux installations classées de compostage soumises à enregistrement sous la rubrique n°2780 sont fixées dans un nouvel arrêté ministériel, daté du 20 avril 2012. Elles sont entrées en vigueur depuis le 3 mai 2012, date de la parution de cet arrêté au Journal Officiel. Elles s'appliquent aux sites soumis à l'enregistrement après cette date.

Consulter ici : l'arrêté du 20/04/2012 relatif aux installations classées de compostage soumises à enregistrement sous la rubrique n°2780.

Pour l'exploitant de la plateforme de compostage, ce texte va apporter des éléments complémentaires à différents niveaux, par rapport aux règles applicables auparavant sur les installations sous le régime d'autorisation :

- administratif :
  documents constitutifs du dossier « installation classée »
- sécurité sur le site : accessibilité en cas de sinistre
- valeurs limites d'émission : modification des valeurs limites d'émission pour le rejet des eaux résiduaires dans le milieu naturel. Ce point est développé plus loin
- épandage des matières compostées ne répondant pas aux critères d'une matière fertilisante et des effluents produits par l'installation :
  . limitation des quantités totales d'azote à 10 t/an
  . limitation du volume total annuel à 500 000 m3/an
  . limitation de la DBO5 totale à 5 t/an

*A noter : les dispositions relatives à l'épandage ne s'appliquent pas aux matières produites exclusivement à partir d'effluents d'élevage, associés ou non à des matières végétales brutes, si l'épandage est effectué sur les terres exploitées par le ou les éleveurs ayant fourni les effluents d'élevage. Les conditions sont alors celles définies pour les effluents de l'élevage d'origine.*

[...]

[...]

## NOUVELLES VALEURS LIMITES D'ÉMISSION : CONSÉQUENCES SUR LES ANALYSES

L'arrêté du 20/04/2012 introduit la notion de flux journalier maximal (FJM) pour les rejets directs dans le milieu naturel. Ainsi les valeurs limites d'émission (VLE) dépendent-elles de ces flux pour les paramètres habituellement suivis au niveau des rejets des ICPE : matières en suspension totales (MEST), demande chimique en oxygène (DCO), demande biologique en oxygène (DBO5), azote global et phosphore total. La conséquence directe est un abaissement des VLE pour les installations dont les effluents sont les plus chargés.

*Valeurs limites d'émission des ICPE, traitant des matières végètales, dechets végètaux, effluents d'élevage, matières stercoraires.*
*Modifications apportées par l'arrêté du 20/04/2012 par rapport à l'arrêté du 22/04/2012.*

| Paramètre | Arrêté du 20/04/2012<br>ICPE Rubrique n°2780 soumise à enregistrement<br>Quantité traitée : ≥ 30 à < 50 t/j | Arrêté du 22/04/2008<br>ICPE soumise à autorisation<br>Quantité traitée : ≥ 30 t/j |
|---|---|---|
| **Matières en suspension totales (MEST)** | 100 mg/l si FJM[1] ≤ 15 kg/j<br>35 mg/l si FJM > 15 kg/j | 100 mg/l |
| **Demande chimique en oxygène (DCO)** | 300 mg/l si FJM ≤ 50 kg/j<br>125 mg/l si FJM > 50 kg/j | 300 mg/l |
| **Demande biologique en oxygène ($DBO_5$)** | 100 mg/l si FJM ≤ 15 kg/j<br>30 mg/l si FJM > 15 kg/j | 100 mg/l |
| **Azote global** | 30 mg/l si FJM ≥ 50 kg/j<br>15 mg/l si FJM ≥ 150 kg/j<br>10 mg/l si FJM ≥ 300 kg/j | 30 mg/l |
| **Phosphore total** | 10 mg/l si FJM ≥ 15 kg/j<br>2 mg/l si FJM ≥ 40 kg/j<br>1 mg/l si FJM ≥ 80 kg/j | 10 mg/l |

Ainsi, la VLE de l'installation ne peut être établie qu'après avoir déterminé ses propres flux journaliers maximaux. Pour les connaître, une mesure de débit sur 24 heures est indispensable, et un prélèvement asservi au volume est fortement recommandé.

Pour plus d'informations : (re)lire Rob'eaux scope et RSDE Plateformes de compostage
LCA mobilise tout son savoir faire pour proposer une solution complète vous permettant de vous reposer sur un prestataire expérimenté pour mener à bien ces nouveaux contrôles réglementaires. A votre écoute nous sommes également là pour vous conseiller.

# LA MATIERE ORGANIQUE NE FAIT PAS *(TOUJOURS)* L'AMENDEMENT

*Publié le 10 mars 2011*

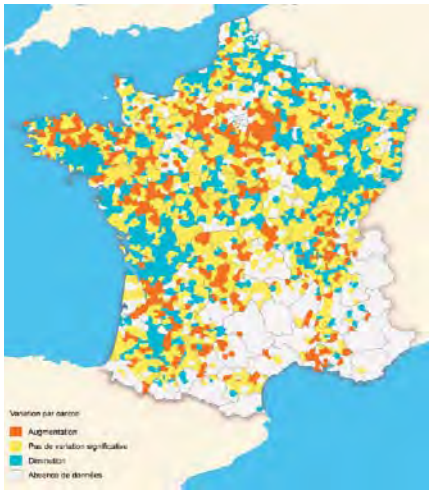



*Figure 1 : Estimation de la variation de la teneur en carbone organique dans les sols entre les périodes 1990-1995 et 1999- source : Gis Sol (BDAT), 2007*

## EVOLUTION DES STOCKS DE CARBONE DES SOLS FRANÇAIS

L'observation de l'évolution des teneurs en matière organique des sols montre que selon les conditions pédo-climatiques, les cultures et les modes d'entretien du sol, certains sols s'enrichissent en matière organique alors que d'autres, à l'opposé, s'appauvrissent (Figure 1).

Globalement, les teneurs en matière organique des sols français décroissent. La perte du stock de carbone organique dans les sols agricoles français est estimée à 6 millions de tonnes de carbone par an, soit près de 0,2 %, entre les périodes 1990-1995 et 1999-2004 (source : Groupement d'Intérêt Scientifique Sols GISsol)

Pourtant les matières organiques du sol assurent de nombreuses fonctions agronomiques et environnementales. Elles proviennent de la transformation des débris végétaux par les organismes vivants, essentiellement les micro-organismes. Composées de 58 % de carbone organique en moyenne, elles libèrent du dioxyde de carbone ($CO_2$) et des composés organiques en se décomposant sous l'influence du climat et des conditions ambiantes du sol. L'évolution du stock de carbone organique dans les sols résulte de l'équilibre entre les apports de matières organiques végétales au sol et leur minéralisation.

## L'AMENDEMENT ORGANIQUE

L'apport d'amendement organique est un moyen parmi d'autres de compenser ces pertes et de conserver le potentiel agronomique des sols cultivés. Toutefois l'offre de produits disponibles est aujourd'hui importante en France, et le choix peut s'avérer difficile pour l'utilisateur ou le prescripteur. Devant cette variété, comment choisir le « meilleur » produit, qui pourra répondre au mieux aux besoins du sol, du végétal et de l'objectif de production de l'agriculteur ? Tout d'abord, qu'attend-on d'un amendement organique ? Réglementairement, les amendements organiques sont des matières fertilisantes. Celles-ci comprennent les engrais, les amendements et, d'une manière générale, tous les produits dont l'emploi est destiné à assurer ou à améliorer la nutrition des végétaux ainsi que les propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols. Les amendements organiques sont définis, dans la norme NF U44-051 (2006)1, comme des matières fertilisantes composées principalement de combinaisons carbonées d'origine végétale, ou animale et végétale en mélange, destinées à l'entretien ou à la reconstitution du stock de matière organique du sol et à l'amélioration de ses propriétés physiques et/ou chimiques et/ou biologiques. Leur rôle nutritif n'est donc pas prépondérant, mais il n'est pas toujours négligeable pour autant.

## VARIABILITÉ DES PRODUITS DISPONIBLES

L'amendement organique le plus répandu en France est le fumier de bovin. Cette terminologie unique cache une grande variété de produits, en fonction de la gestion du troupeau, du type d'animaux, de la stabulation, du degré de maturité du produit.

C'est souvent le cas des engrais dits « de ferme » (Figure 2).

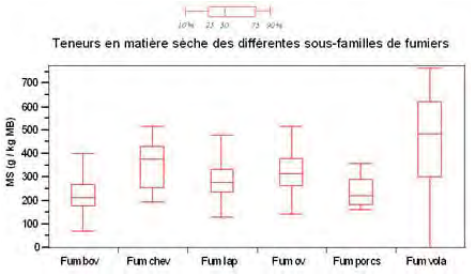



*Figure 2 : Variabilité des teneurs en matière sèche des fumiers Source : Guillotin M-L, Jordan-Meille L, 2007. Caractérisation agronomique de produits organiques à partir d'une base de données d'un laboratoire d'analyses. In "8èmes Journées de la fertilisation raisonnée et de l'analyse de terre", GEMAS-COMIFER, Blois, 2007*

Ces produits présentent l'avantage d'être disponibles en grande quantité, et s'ils ne sont pas gratuits, ils sont souvent proposés à un prix inférieur aux produits mis sur le marché. Ces derniers sont le plus souvent normalisés. De ce fait leurs caractéristiques sont vérifiées et validées. Avant la mise sur le marché d'un produit, le producteur s'est assuré qu'il est bien conforme à la norme à laquelle il est rattaché : NF U 44-051 pour les amendements organiques sans boues et NF U 44-095 pour les amendements organiques contenant des Matières d'Intérêt Agronomique issues du Traitement des Eaux (MIATEs). Dans ce cas, un certain nombre d'analyses est exigé, afin de vérifier l'innocuité du produit, ses effets bénéfiques, ses caractéristiques spécifiques, comme sa vitesse de minéralisation, sa stabilité biologique. Certains renseignements obligatoires sont consignés sur l'étiquette du produit, sur l'emballage ou dans un document d'accompagnement.
La norme des amendements organiques NF U 44-051 comprend 11 dénominations de type, qui dépendent des matières premières employées et du mode d'obtention (compostage / lombricompostage / simple mélange…). Ainsi, même si l'objectif commun d'un amendement organique est d'apporter au sol de la matière organique, selon le type de produit, les effets obtenus ne seront pas les mêmes. C'est pourquoi il est important de bien lire les étiquettes, et de solliciter le producteur pour tout complément d'information sur le produit acheté.

L'amendement organique universel n'existe pas. Il existe un produit adapté à chaque situation agronomique, et chaque produit peut répondre à un besoin agronomique. Pour bien choisir et appliquer un produit en réponse à un effet, il est utile de coupler les caractéristiques de l'amendement organique avec une analyse du sol.

## DES POTENTIELS AMENDANTS DIFFÉRENTS

Mais ce n'est pas parce qu'un produit est plus riche en matière organique qu'un autre produit, qu'il sera forcément plus performant ! La matière organique s'apprécie à la fois par la quantité présente, mais aussi par son état de maturité et sa stabilité. Ainsi, les produits qui ont tendance à fortement minéraliser permettront de relancer l'activité biologique du sol (stimulation de la biomasse microbienne). Les amendements organiques bien stabilisés ont quant à eux un fort potentiel amendant et seront à privilégier pour structurer et enrichir durablement le sol en matière organique.

## QUELQUES OUTILS DE DIAGNOSTIC

· **L'analyse chimique classique** d'un produit organique est une première étape pour en connaître sa valeur fertilisante potentielle. En dosant les concentrations en éléments fertilisants et en matières organiques, on caractérise de façon « quantitative » le produit. La matière organique et certains éléments, comme l'azote ou encore le phosphore, ne s'expriment pas de la même façon selon la nature même de l'amendement et de son état de maturité.
· **Les analyses spécifiques,** comme la cinétique de minéralisation du carbone et de l'azote ou l'indice de stabilité biologique (ISMO), permettent de mieux appréhender la façon dont cette matière organique évoluera, une fois le produit apporté au sol.

*(1) NF U44-051 (2006) : Amendements organiques -Dénominations, spécifications et marquage*

# ACTUALITÉ : PHOSPHORE DES COMPOSTS DE MIATES

*Publié le 10 mai 2012*

Depuis 2004, la réglementation française sur les matières fertilisantes permet de mettre sur le marché des composts contenant des Matières d'Intérêt Agronomique issues du Traitement des Eaux (MIATES) conformes à la norme NF U 44-095 (1). Cette norme fixe les spécifications techniques à respecter par les produits, et exige notamment de ne pas dépasser la teneur de 3%, exprimée sur le produit brut, pour chacun des éléments N, P2O5 et K2O. La somme de ces trois éléments doit aussi rester inférieure à 7% du produit brut. Par ailleurs, elle suppose de respecter des teneurs minimales sur certains paramètres agronomiques (matière sèche, matière organique, rapport C/N). Elle comporte également des critères d'innocuité.

Du fait de l'équilibre N-P-K des matières premières utilisées dans l'élaboration de ces composts, et en particulier de par la présence de boues de stations d'épuration, le phosphore peut se retrouver à des concentrations proches des 3%, voire supérieures, dans les produits finis. Cet « excès » de phosphore va empêcher la valorisation du compost selon la norme NF U 44-095, même si tous les autres critères de conformité sont validés. Le sujet « Compost de MIATE ayant des teneurs en P2O5 supérieures à 3% » est pris en considération actuellement par les bureaux de normalisation. Afin de mieux caractériser ces composts dont la teneur en P2O5 dépasse les 3%, le groupe de travail en charge du sujet a souhaité diffuser un questionnaire, que vous pourrez télécharger en cliquant sur le lien qui suit : Enquêtede caractérisation des composts de MIATEs

Vous avez la possibilité de répondre à ce questionnaire, qu'il nous a paru utile de pouvoir diffuser (avec l'accord de l'AFNOR), afin d'avoir une norme au plus proche du marché et de prendre en compte la plus grande variabilité de ces composts. Les questionnaires sont à retourner à l'animatrice du groupe de travail (dont les coordonnées sont précisées dans le document téléchargeable) avant le 15 juin 2012.

*(1) NF U 44-095 (mai 2002) : Amendements organiques – Composts contenant des matières d'intérêt agronomique, issues du traitement des eaux. Norme rendue d'application obligatoire par l'arrêté ministériel du 18/03/2004. Cette norme a été complétée par un amendement (NF U 44-095/A1 d'octobre 2008), lui-même rendu d'application obligatoire par l'arrêté ministériel du 12/02/2011.*

# ISMO GOOD

*Publié le 8 mars 2012*

*Si les écosystèmes naturels stockent habituellement la matière organique dans les sols (en dehors de tout changement climatique !), la mise en culture des terres aboutit invariablement à la réduction de sa teneur. Or les matières organiques du sol participent à un grand nombre de fonctions. Elles jouent un rôle important dans le maintien de sa fertilité physique, chimique et biologique. Les itinéraires techniques ont un rôle à jouer dans l'évolution des stocks de matière organique. Ainsi, certaines pratiques vont aider à entretenir, voire à augmenter, ces stocks : réduction du travail du sol, restitution des pailles, ajout de cultures intermédiaires, incorporation d'engrais verts, apport de matières organiques exogènes….*

## LA NAISSANCE DE L'ISMO

Les agronomes qui s'intéressent aux bilans humiques ont besoin d'outils pour évaluer et comparer l'efficacité de ces différentes pratiques. Pour ce faire, ils disposent de données bibliographiques sur le coefficient iso-humique (K1)(I) de différentes matières utilisées traditionnellement en agriculture (pailles, fumier, etc …).

Ces valeurs ont été établies par des essais aux champs de longues durées dans différents contextes pédoclimatiques. Mais l'approche expérimentale est longue, coûteuse, et répond mal aux souhaits des fabricants, prescripteurs et utilisateurs des produits organiques, absents de ces essais de référence. La question se pose notamment pour tous les produits issus du recyclage des matières organiques urbaines ou industrielles, ou pour les produits élaborés par mélange de matières premières, pour lesquels aucun essai n'avait été mené : il était devenu nécessaire de développer les expérimentations, dans le but d'élargir les données de références sur ces produits.

Les chercheurs ont donc élaboré des méthodes d'analyses en laboratoire, afin de mettre en relation les caractéristiques biochimiques des produits et leur vitesse de dégradation dans le sol (minéralisation de la MO). Les premiers travaux ont abouti à la proposition d'indices, appelés ISB (Indice de Stabilité Biochimique) et Tr (Taux résiduel), normalisés en 2002 (prNF XP U44-162). Ces indices ont été révisés récemment pour mieux prendre en compte les nouveaux produits organiques disponibles aujourd'hui.
Ils ont été réunis dans un indicateur unique, **l'Indice de Stabilité de la Matière Organique** (ISMO – norme XP U 44-162, Décembre 2009). Cet indicateur a pour objectif d'exprimer a priori dans le produit initial le pourcentage de matière organique potentiellement résistante à la dégradation. Ainsi, plus la valeur d'ISMO est élevée, plus le potentiel amendant organique du produit est élevé.

## DE BONNES BASES

Établi sur la base d'études de minéralisation de longues durées, il estime mieux les phénomènes intervenant sur le long terme. Par ailleurs établi sur un grand nombre et des types différents de produits, sa robustesse est améliorée par rapport aux indicateurs ISB et Tr.

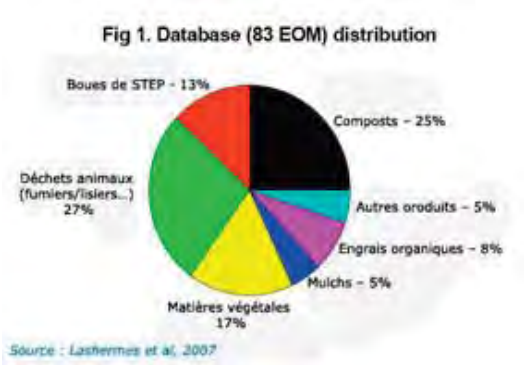


Fig 1. Database (83 EOM) distribution
Boues de STEP - 13%
Composts - 25%
Déchets animaux (fumiers/lisiers...) 27%
Autres oroduits - 5%
Engrais organiques - 8%
Mulchs - 5%
Matières végétales 17%
Source : Lashermes et al, 2007

Les études réalisées lors de l'élaboration de cet indice ont montré une bonne prédiction du carbone non minéralisé.

## AU LABORATOIRE

Le principe de la méthode d'analyse est une **caractérisation de la matière organique** par solubilisations successives. L'objectif de l'analyse est, dans un premier temps, de fractionner le produit organique en différentes composantes biochimiques telle que : la fraction soluble, la fraction hémicellulose, la fraction cellulose (calculée) et la fraction lignine et cutine.
L'analyse est effectuée sur un échantillon préalablement séché à 38°C et broyé à 1 mm.(cf : la détermination des fractions biochimiques en schéma)

Les fractions organiques ainsi déterminées sont alors utilisées pour calculer un indicateur qui détermine a priori, dans le produit initial, la proportion de matière organique potentiellement résistante à la minéralisation. La proportion de **chaque fraction dans le produit permet donc de juger de la stabilité du produit**.Les fractions ainsi caractérisées permettent d'obtenir, par différences, les termes de l'équation utilisée pour calculer l'indice.

## UN PETIT PLUS PAR RAPPORT À L'ISB/TR :

ISMO intègre, en plus des fractions biochimiques mesurées, le carbone minéralisé à 3 jours (selon XP U 44-163) : cet indice résulte donc à la fois d'un dosage purement « chimique » et d'une mesure « biologique » (mesure du dégagement de $CO_2$ libéré par le produit), ce qui permet de confronter la composition de la matière organique de l'amendement avec l'allure de sa dégradation.

**À noter : cette méthode n'est applicable qu'aux amendements organiques et supports de culture ayant au moins 20% de MO sur MS.**

## LIMITES DE L'ISMO

Comme pour toute détermination analytique, le résultat de l'ISMO est soumis à une incertitude. Dans l'état actuel des connaissances, des différences d'au moins +/- 5 sur la valeur de l'ISMO en absolu semblent correspondre à la variabilité analytique normale. A cela, viennent s'ajouter les variabilités liées à l'échantillonnage.

Certains produits (1 à 5% selon les sources) peuvent présenter des résultats aberrants du fractionnement biochimique (fraction significativement négative) :

– Produits contenant des soies de porcs

– Certains produits d'origine viticole (marcs)

– Grains de maïs frais

– Quelques composts de MIATE, végétaux broyés, composts de DV + biodéchets

– + autres à déterminer

Dans ce cas, le calcul de l'ISMO doit alors se faire à partir d'autres approches (cinétique de minéralisation au laboratoire par exemple).

## COMPARAISON À L'ISB

Par rapport à son prédécesseur, l'ISB, le calcul de l'ISMO a tendance à fournir des valeurs plus élevées pour un même produit.

En réalité l'ISB et l'ISMO ne reposent pas sur les mêmes hypothèses d'évolution des matières organiques dans le sol. Dans le cadre de l'ISB, la matière organique stabilisée présente un taux de minéralisation inférieur ou égale à 1% / an, tandis que pour l'ISMO, un coefficient de stabilité de 2% par an a été retenue. Ceci peut expliquer les écarts observés. Les modèles de prédictions de l'évolution de la matière organique dans les sols à appliquer ne sont donc pas les mêmes, selon que l'on utilise l'ISB ou l'ISMO (II).

[...]

[...]

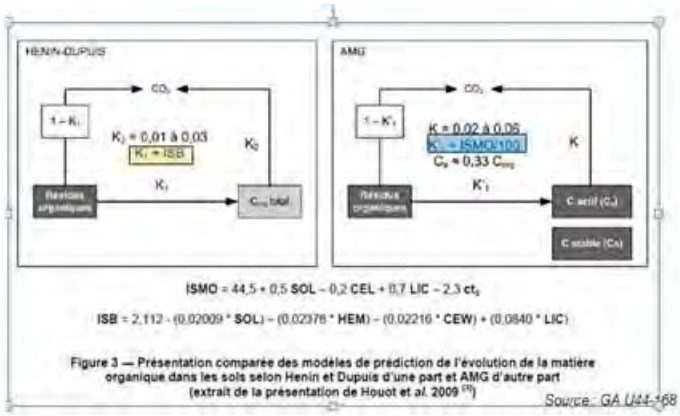



Figure 3 — Présentation comparée des modèles de prédiction de l'évolution de la matière organique dans les sols selon Henin et Dupuis d'une part et AMG d'autre part (extrait de la présentation de Houot et *al.* 2009 [15])

Source : GA U44-168

## L'UTILISATION DE L'ISMO EN PRATIQUE

L'ISMO, comme les résultats de cinétiques, permet d'estimer des potentiels obtenus en laboratoire dans des conditions optimales.

Au champ, l'expression de ces potentiels sera modulée par différents facteurs :

– Caractéristiques physico-chimiques et biologiques du sol (% d'argile, pH, ....)

– Climat

– Pratiques culturales

– Sol nu / cultivé

– Caractéristiques physiques du produit (granulométrie, présentation)

Par conséquent, la transposition des potentiels au champ ne peut pas être directe. Par contre, les classements des produits les uns par rapport aux autres restent pertinents.

## QUAND DEMANDER LA DÉTERMINATION DE L'ISMO ?

La mesure de l'ISMO est intéressante pour caractériser un produit organique : la valeur obtenue permet de classer le produit dans une catégorie, et ainsi d'en revendiquer ses propriétés (effet amendant ou au contraire rôle d'activateur biologique).

L'ISMO, au même titre que la cinétique de minéralisation du carbone et de l'azote, est un élément de marquage obligatoire pour les composts de MIATE. Il figure aussi dans la norme NF U44-051, comme marquage facultatif (mais même pour ces produits, l'analyse est obligatoire à la création).

*I- Le coefficient isohumique K1 est défini par HENIN et TURC (INRA) en 1957 comme l'expression de la quantité d'humus formé en fonction de la quantité de matière sèche du produit organique apporté au sol. Déterminé expérimentalement par comparatif de bilans humiques d'un sol (parcelles ou pots) avec ou sans produits organiques sur une période minimum de 3 ans, cette valeur du K1 dépend donc étroitement de la nature du sol et de son potentiel biogéologique d'humification.*
*II -Le modèle Hénin-Dupuis s'utilise avec l'indice ISB ou K1 du produit organique, couplé au coefficient K2. Le nouveau modèle AMG a été développé afin d'intégrer l'ISMO dans les prédictions d'évolution de la MO des sols. Dans ce modèle, le coefficient de minéralisation de la matière organique du sol considéré n'est plus le K2, mais un nouveau coefficient k' exprimant le taux d'incorporation de la MO exogène à la MO du sol (le stock de carbone organique est considéré en distinguant deux compartiments, un actif et un stable).*

# LES PRO FONT LEUR CINEma *(PARTIE 1/2)*

*Publication du 24 mai 2013*

Régulièrement abordé par l'AgroReporter, le thème de la gestion de la matière organique des sols reste un sujet qui n'a pas fini de préoccuper les acteurs du monde agricole et environnemental.
Si l'entretien des stocks de matière organique est primordial pour maintenir un bon fonctionnement du sol, il est parfois nécessaire de corriger un état initial faible, ou de réactiver la biomasse microbienne « endormie » (ou en activité réduite). C'est à ce niveau que les Produits Résiduaires Organiques (PRO) entrent en jeu, en apportant au sol de la matière organique (MO). Ils peuvent, en supplément, apporter des éléments fertilisants, parfois en quantités non négligeables ou en tout cas suffisante pour les déduire d'une fertilisation minérale. Pourtant, tous ces produits n'ont pas les mêmes capacités à entretenir le niveau organique des sols, ou pour être plus juste, les mêmes comportements. Selon leur état de maturité, les matières premières entrantes dans leur fabrication (nature et proportion)… l'évolution de la MO ne sera pas la même. Cette variabilité intra-produit est surtout observée parmi les engrais de ferme, mais également au niveau des boues, des composts ou encore des matières végétales.
Cet article de l'Agroreporter se penche sur l'outil permettant de caractériser cette évolution : **la cinétique de minéralisation du carbone** et de l'azote. Analyse obligatoire pour les amendements organiques normalisés, elle a pour but d'apprécier plus finement l'impact d'un produit sur le sol, et s'intéresse également à la dynamique de l'azote.

## DIFFÉRENTS PRODUITS, AUTANT DE COMPORTEMENTS

Lorsque l'on apporte un produit organique au sol, l'objectif peut être multiple : apporter des éléments nutritifs sous forme organique, enrichir/maintenir le stock de matière organique du sol, ces deux fonctions pouvant être portées par un même produit. Ainsi, on attend généralement d'un compost qu'il se minéralise régulièrement mais lentement, une fois épandu, et contribue à alimenter le stock d'humus stable. Les engrais organiques auront plutôt un rôle nutritif et fourniront de l'azote, tandis que le carbone continuera à se minéraliser. À l'inverse, un produit plus pailleux peut entraîner une « faim d'azote » (ou immobilisation), les microorganismes consommant de l'azote du sol pour dégrader la matière organique du PRO.

Alors, y a-t-il de « bons » produits organiques et des « mauvais » ? Il n'est pas question de qualifier certains produits comme étant « bon » ou « mauvais », mais plutôt d'adapter les apports ou choisir le produit, en fonction de son comportement, selon les besoins réels du sol et des cultures. Un produit qui immobilise de l'azote, entraînant a priori une faim d'azote et nécessitant alors un apport complémentaire, peut au contraire être appliqué en automne, si l'on veut éviter les pertes d'azote dans les nappes (pièges à nitrates). Les produits qui ont tendance à dégager beaucoup de $CO_2$ dès l'incorporation au champ, comme les engrais organique, par exemple, trouveront un intérêt pour relancer l'activité microbienne, dans un sol biologiquement peu actif (en stimulant la biomasse microbienne), en complément de leur rôle nutritif.

## LES LIMITES DE L'ANALYSE CHIMIQUE ET DU RAPPORT C/N

L'analyse chimique « simple » ne permet pas d'apprécier la véritable biodégradabilité du produit. Celle-ci est fréquemment approchée par la valeur du C/N, mais ce rapport reste un indicateur parfois trompeur de l'évolution des PRO, car en général très dépendant des constituants biochimiques qui les constituent (hémicelluloses, celluloses, lignines et cutines) dont les vitesses de dégradation sont différentes. De plus, la granulométrie du PRO est aussi à prendre en compte, mais elle est ignorée par l'analyse chimique qui se réalise après broyage du produit.

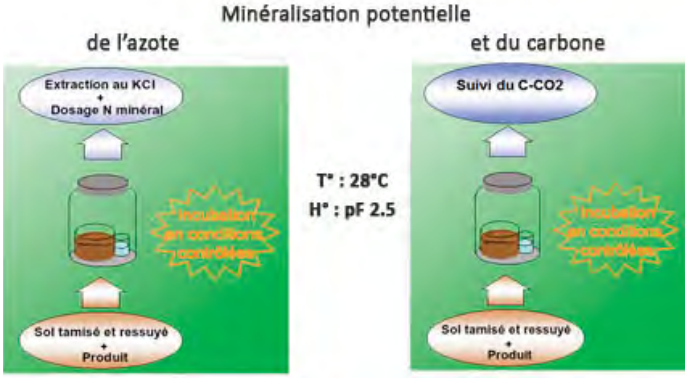
On a ainsi pu observer que :

- Il n'existe pas de relation évidente entre le rapport C/N et la stabilité (définie par des méthodes biochimiques). Le critère C/N, considéré seul, n'est pas toujours pertinent.
- La relation entre le rapport C/N et les vitesses de minéralisation n'est pas systématique : certains produits présentent des vitesses de minéralisation lentes avec des valeurs basses du C/N, d'autres des vitesses de minéralisation rapides avec des valeurs de C/N élevées.
- La variabilité des produits et leur diversité de comportement vis-à-vis de la minéralisation du carbone sont importantes.

Ces observations montrent l'intérêt de disposer d'outils spécifiques pour caractériser le comportement de ces PRO dans le sol.

## L'OUTIL : CINÉTIQUE DE MINÉRALISATION POTENTIELLE AU LABORATOIRE

La caractérisation de la matière organique par la minéralisation potentielle du carbone et de l'azote, plus couramment appelée CINET au laboratoire LCA, est réalisée selon la norme XP U44-163, publiée par l'AFNOR en décembre 2009 et rendue d'application obligatoire depuis le 14 janvier 2010.




L'objectif du test est d'estimer la capacité de minéralisation du Carbone et de l'Azote d'un amendement organique ou d'un support de culture par incubation en conditions contrôlées à 28°C.

On détermine un coefficient de minéralisation (destruction du Carbone) de la MO du produit sur 91 jours.
De même, le suivi de la minéralisation de l'azote permet d'apprécier le comportement de l'azote organique (immobilisation / fourniture).

Il permet d'extrapoler le comportement du produit observé au laboratoire à son comportement probable au champ sur les deux premières années suivant son épandage

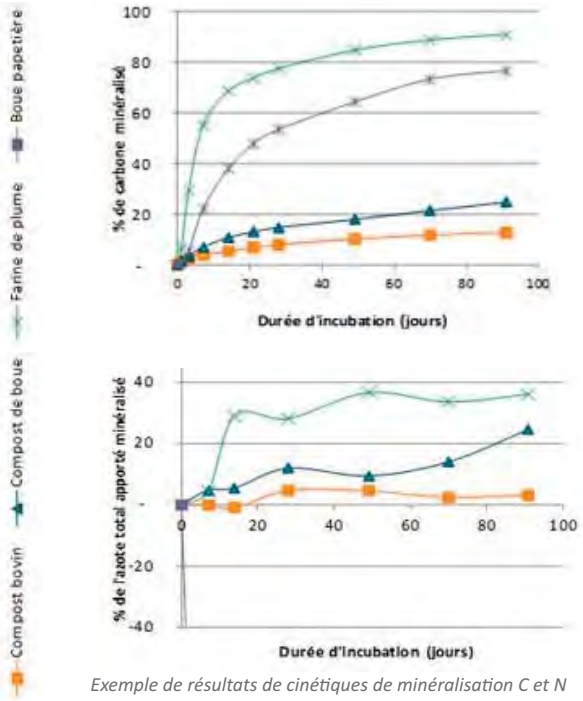
# LES PRO FONT LEUR CINEma *(PARTIE 2/2)*

*Publication du 30 mai 2013*

L'article "Les PRO font leur CINEMA" du 23 mai 2013 décrivait la méthodologie des cinétiques de minéralisation du Carbone et de l'Azote des produits organiques (PRO). Cette seconde partie est dédiée à l'interprétation et à l'utilisation des résultats.

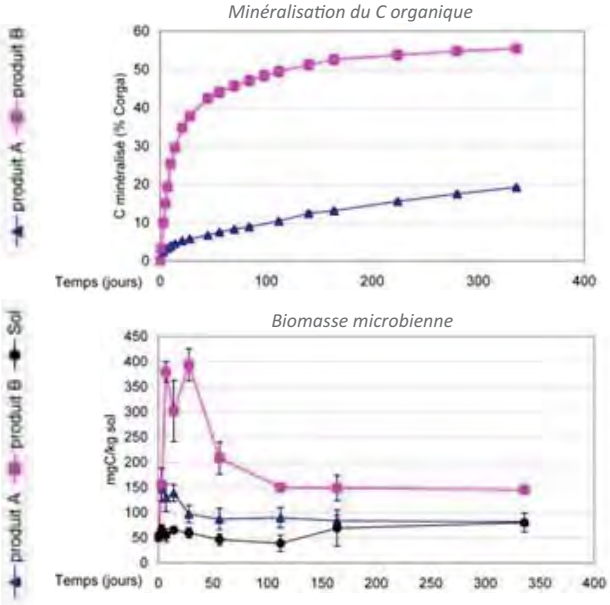
## EXPRESSION DES RÉSULTATS ET INTERPRÉTATION

À l'issue de l'incubation de sol et de PRO, les quantités de carbone et d'azote minéralisées sont mesurées et, après avoir soustrait les valeurs obtenues avec le sol de référence seul, sont exprimées en pourcentage des quantités respectives apportées de chacun des éléments. Les résultats de carbone et d'azote minéralisés lors de chaque mesure sont reportés sur des graphiques.




*Exemple de résultats de cinétiques de minéralisation C et N de différents types de produits. Source : LCA*

La pente à l'origine de chacune de ces courbes donne une première indication sur la vitesse de minéralisation du carbone :



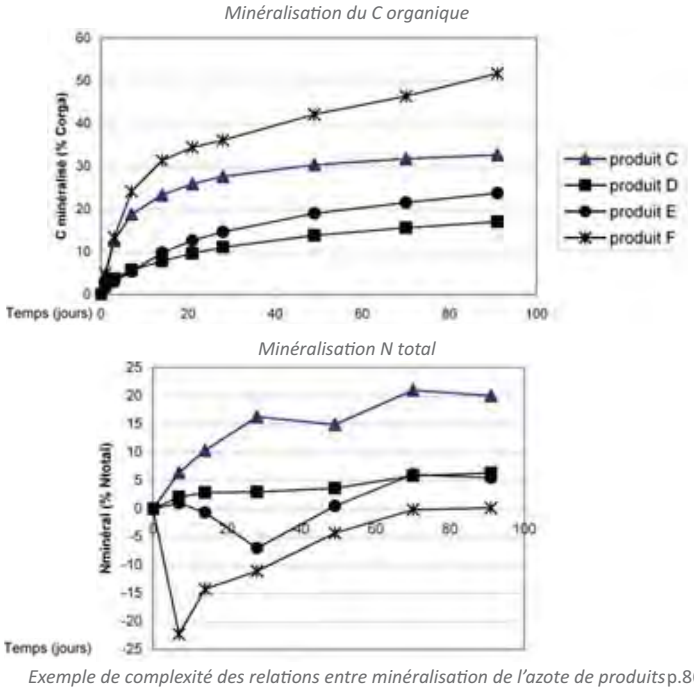

*Relation entre minéralisation du carbone de PRO et dynamique de la biomasse microbienne d'un sol. Source : guide d'application GA U44-168.*

Le produit B dont le carbone est fortement minéralisable stimule plus la biomasse microbienne du sol que le produit A dont la minéralisation est plus faible.

## RELATION COMPLEXE ENTRE LE CARBONE ET L'AZOTE

La mise en œuvre d'une cinétique de minéralisation du carbone et de l'azote donne deux informations sur le comportement du produit testé : d'une part les capacités de minéralisation de son carbone, d'autre part, les capacités d'immobilisation ou de libération de son azote. Il est d'ailleurs, dans le cadre d'essai ou de suivi sur différents produits, tout à fait possible de ne demander que l'une des deux cinétiques, au lieu du pack complet. Les normes des amendements organiques NF U 44-051 et NF U 44-095 exigent par contre de faire les deux cinétiques, C et N.

La minéralisation du carbone permet d'évaluer la stabilité du produit, alors que la cinétique de minéralisation de l'azote renseigne davantage sur son état de maturité. Si la courbe de cinétique du carbone est forcément progressive et croissante au cours du temps (la dégradation du C organique en CO2 étant une réaction irréversible), la courbe de minéralisation de l'azote peut prendre toutes sortes d'allures. En effet, à l'inverse de la minéralisation du carbone organique, le cycle de l'azote est plus complexe. L'azote peut passer par une phase d'immobilisation, parfois temporaire (immobilisation suivie à plus ou moins long terme par une fourniture positive d'azote minéral), parfois continue. Cette immobilisation, ou réorganisation de l'azote, traduit le fait que la minéralisation de la matière organique du produit consomme de l'azote minéral du sol. Ceci est dû au fait que la matière organique constitue un aliment et une source d'énergie pour la biomasse microbienne. La multiplication de cette dernière conduit à un stockage de l'azote sous forme organique. C'est donc potentiellement de l'azote « emprunté » au sol, qui sera restitué ultérieurement.




*Exemple de complexité des relations entre minéralisation de l'azote de produits organiques. Source : guide d'application GA U44-168.*

p.86

[...]

[...]

Pour les deux produits ayant une forte minéralisation du C (F et C), la minéralisation du N est très différente. Le C/N des produits est un paramètre explicatif important (produit C : 6, produit D : 13, produit E : 16 et produit F : 16). Les produits D et E ont tous deux une minéralisation C faible, mais pour le produit D la minéralisation du N est faible mais positive alors que pour le produit E, la minéralisation du N passe par une immobilisation temporaire.

Tous les produits ne sont donc pas égaux en fonction de leur rapport C/N et de la nature de leurs constituants biochimiques :

- On peut avoir un produit (très) stable, c'est-à-dire ayant une minéralisation du C faible (< 20 %), mais immature, car la courbe de minéralisation de l'azote montre une immobilisation au cours de l'essai, sans parvenir à fournir de l'azote. C'est l'azote qui constitue le facteur limitant de la dégradation de ce produit,
- Un produit peut être instable (forte minéralisation du C, et encore en progression au bout de 91 jours), tout en ayant une minéralisation de N importante ; c'est généralement le cas des engrais organique ;
- Enfin, on peut se trouver face à un produit instable et immature (forte minéralisation du carbone et immobilisation continue de l'azote).

Les produits dits « instables » ont un intérêt pour stimuler le pool de biomasse microbienne du sol, alors que les produits « stables » contribuent à enrichir le sol en matière organique stable.

C'est pourquoi, comme le rappelle cet Extrait du guide d'application GA U44-168 : « l'amendement organique universel n'existe pas. Il existe un produit adapté à chaque situation agronomique, et chaque produit peut répondre à un besoin agronomique. Pour bien choisir et appliquer un produit en réponse à un effet, il est utile de coupler les caractéristiques de l'amendement organique avec une analyse du sol ».

## OUI, MAIS….

… il faut néanmoins prudence garder face aux résultats des cinétiques de minéralisation réalisées en laboratoire. Les résultats de laboratoire sont donnés pour des conditions standards de température et d'humidité. Sont-ils extrapolables au champ ? La dynamique de minéralisation est étroitement liée aux variables « Température » et « Humidité ». L'évolution de ces facteurs-clés en conditions réelles au champ peut nuancer la cinétique, une fois le produit épandu au champ, de même que la présentation du produit (granulométrie, produit pulvérulent vs granulés…) (1)

**Cas particuliers :**

Il existe des produits qui continuent à se minéraliser après 91 jours d'incubation au laboratoire : l'ISMO serait plutôt recommandé, dans ces cas-là, si l'on veut connaître plus précisément le rendement en matière organique stable du produit.

D'autres types de test permettent d'évaluer l'état de maturité d'un compost, comme les tests d'inhibition de la germination sur cresson, les tests de maturité respirométriques (suivi de l'activité microbienne par mesure du dégagement de $CO_2$ sur 7 jours) ou des tests de maturité de type Rottegrad, (suivi des températures).

L'ensemble des tests de caractérisation approfondie des PRO est proposé au LCA, au sein de sa filiale Celesta-Lab. N'hésitez pas à nous contacter pour tout conseil, information ou interprétation.

# INERTES ET INDÉSIRABLES

*Publié le 19 janvier 2012*

Les objectifs nationaux en matière de recyclage matière et organique des déchets, fixés par la Loi Grenelle 1 du 3 août 2009, sont « d'orienter vers ces filières un taux de 35 % des déchets ménagers et assimilés en 2012 et 45 % en 2015 contre 24 % en 2004 » (Loi n°2009-967, Titre III, Chapitre II). Dans ce contexte, la mesure au laboratoire des éléments dits inertes et indésirables (plastiques, morceaux de verre, éléments métalliques…) revêt une importance particulière. Focus sur cette méthode, proposée depuis plusieurs années par le LCA et aujourd'hui en cours d'accréditation Cofrac.

## AU LABORATOIRE

Le principe de la méthode est assez simple : après avoir détruit la matière organique du produit par une attaque à l'eau de javel, les inertes sont séparés en fonction de leur densité (première séparation des légers à l'eau, puis séparation des autres plastiques et des lourds par tri densimétrique dans du CaCl2 en sursaturation). Après séchage, on les trie manuellement en fonction de leur taille et de leur nature, le tri densimétrique ne parvenant pas toujours à séparer parfaitement les différentes familles. Cette méthode, normalisée sous la référence XP U44-164 depuis 2004, permet de déterminer la quantité d'éléments exogènes (cailloux et calcaire, verres, métaux, films et PSE, autres plastiques et textiles) contenus dans un produit organique. Réalisée en routine depuis plus de 8 ans par le laboratoire Celesta-lab (dont LCA est partenaire et actionnaire), cette méthode est appliquée en très grande majorité sur les amendements organiques normalisés. Une centaine d'analyses « d'inertes » est ainsi réalisée chaque mois.
La qualification du produit est ensuite définie en confrontant la quantité d'éléments inertes au cahier des charges afférent.

| Cahier des charges ou norme | Contraintes et tolérances sur la teneur en inertes (en % MS) | |
|---|---|---|
| Ecolabel | Verre + métaux + plastiques > 2 mm | < 0,5 % |
| NF U 44-051 | Film + PSE > 5 mm | < 0,3 % |
| NF U 44-095 | Autres plastiques > 5 mm | < 0,8 % |
| | Verres et métaux | < 2 % |

Enfin, on peut souligner que la méthodologie appliquée à l'analyse des inertes peut être déclinée pour d'autres usages, comme pour déterminer la quantité de matière organique non synthétique (MONS).

## UN PEU DE POLÉMIQUE …

Cette expérience explique le savoir-faire du laboratoire. Elle lui permet aussi de bien connaître les points sensibles de la méthode. Il ressort que la qualité et la reproductibilité de l'étape de tri manuel reposent sur l'expérience et le savoir-faire de l'opérateur, surtout pour des produits plus complexes que les amendements organiques traditionnels. En effet, malgré l'attaque à l'eau de javel et le premier tri densimétrique des inertes, de nombreux plastiques présentent des densités proches ou supérieures à celle du CaCl2 en sursaturation. D'autres difficultés apparaissent également lorsque des matériaux de natures différentes restent agrégés, ou par leur nature peuvent être classés dans deux catégories différentes (exemple des matériaux mixtes comme les plastiques aluminisés). Il est donc capital de s'adresser à « un laboratoire qui a l'habitude » de ce genre d'analyses. Nous avons également observé depuis quelques années l'évolution des produits, en lien avec le développement de nouveaux procédés (comme le TBM) et des filières de valorisation organique des déchets. L'évolution prévue de la méthode normalisée d'analyse des « composants inertes » XP U44-164 devra prendre en considération les difficultés techniques rencontrées par les laboratoires sur les produit potentiellement plus « chargés » en inertes. Celesta-Lab participe à la fois aux essais inter-laboratoires et est un membre actif du groupe de travail chargé du suivi de cette norme.

## QUID DE L'ACCRÉDITATION

Les « inertes » font partie des paramètres de conformité des produits organiques aux normes NF U44-095 (composts contenant des matières issues du traitement des eaux) et NF U44-051 (amendements organiques). Comme pour les éléments traces métalliques et organiques et les micro-organismes pathogènes, un dépassement des valeurs limites réglementaires entraîne une non-conformité du produit à la norme. Conscient de ces enjeux, le laboratoire Celesta-Lab s'est engagé dans une démarche d'accréditation de ses prestations par le Comité Français d'Accréditation (COFRAC). Nous espérons pouvoir vous annoncer dans un prochain article l'accréditation des résultats d' « inertes » !

# MONS, OU COMMENT SÉPARER LE BON GRAIN DE L'IVRAIE

*Publication du 11 octobre 2012*

La matière organique n'est pas forcément issue du vivant. La Chimie nous a apporté ces dernières décennies de nouveaux composés dont nous faisons un large usage. Parmi eux : les matières plastiques. Comme nos déchets reflètent nos modes de consommation, nos poubelles en contiennent une part plus ou moins importante, en fonction aussi des modes de collecte sélective des déchets. Or ces plastiques étant constitués de chaines carbonées, leur nature est organique. Analytiquement, il est impossible pour un laboratoire, par une simple calcination ou mesure du carbone, de distinguer le carbone des plastiques du carbone de la « vraie » matière organique. Pour séparer le bon grain de l'ivraie, il convient d'adopter une autre approche.

## MO = MONS + MOS

La matière organique d'un déchet ou d'un produit organique est constituée de matière organique non synthétique et de matière organique synthétique.

La matière organique non synthétique (MONS) est la matière organique naturelle, végétale et/ou animale, par opposition aux matières plastiques qui correspondent à la matière organique synthétique (MOS). La MOS correspond à la matière plastique d'origine pétrolière difficilement ou non biodégradable. L'ensemble MONS + MOS correspond à la matière organique totale, dosée par perte au feu de la matière sèche (par exemple) au laboratoire.

## POURQUOI S'INTÉRESSER À LA MONS

La MONS constitue la partie dégradable par les microorganismes d'un produit organique, utile dans le cas d'une valorisation matière (par compostage) ou énergétique (par digestion anaérobie). En effet, au cours du processus de biodégradation, la fraction la plus labile de la MONS va être consommée par les microorganismes, qui vont la minéraliser. En parallèle, dans le cas de la méthanisation, ils peuvent générer du biogaz. Le reste de la MONS est stabilisé par les microorganismes.

La connaissance du ratio MONS/MO totale est donc particulièrement utile dans le cas de déchets potentiellement pollués par des matières plastiques, lorsqu'on veut connaître la fraction de matière organique biodégradable et valorisable.

## CAS PARTICULIER DES DÉCHETS DESTINÉS À L'INCINÉRATION

A l'inverse des filières de valorisation matière, les exploitants d'unités d'incinération des ordures ménagères (UIOM) recherchent plutôt des déchets riches en MOS (et non en MONS !). En effet, du fait de la présence de matières plastiques, le pouvoir calorifique de ces déchets (PCI) est plus intéressant pour eux.

## AU LABORATOIRE

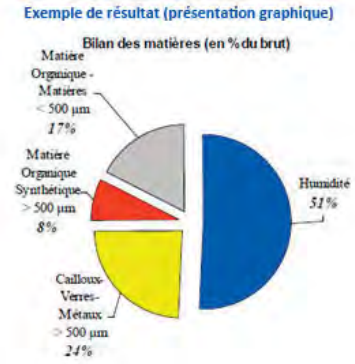
Pour déterminer les MONS, le laboratoire Celesta-Lab (filiale de LCA) a mis au point une méthode, baptisée « BILAN MATIERE ». Elle s'inspire de la norme XP U44-164 de la caractérisation des composants inertes d'un déchet organique.

La matière organique de l'échantillon, séché à 80°C ou brut, est détruite après plusieurs bains de javel. La fraction inorganique est récupérée et passée sur un tamis de 500 µm qui sert à différencier 3 fractions :

- les matières organiques synthétiques > 500 µm : plastiques durs, textiles, films plastiques, polystyrène expansé (PSE), définis selon la norme XP U44-164 ;
- les cailloux, calcaires, verres et métaux > 500 µm, définis selon XP U44-164 ;
- Les particules fines qui représentent toutes les particules inférieures à 500 µm.

## RÉSULTATS ET INTERPRÉTATION

Exemple de résultat (présentation graphique)




L'analyse permet de quantifier l'ensemble des éléments inertes d'un déchet ménager susceptible de contenir encore de la matière organique non synthétique.

Le résultat d'analyse donne ainsi directement :

- la quantité de MOS supérieure à 500 µm : elle traduit la quantité massique de plastiques dans le déchet, en grammes de plastiques pour 100 grammes de déchet brut ;
- les autres éléments inertes (verres, cailloux, métaux) supérieurs à 500 µm : ils quantifient les éléments minéraux indésirables, sans en donner la dimension toutefois, en grammes pour 100 grammes de déchet ;
- la quantité de MO dégradable par les microorganismes (MONS), quelque soit sa dimension. La méthode d'analyse ne permet pas de la distinguer des fractions inférieures à 500 µm.

L'analyse informe aussi sur le taux global d'inertes (cailloux, verres, métaux), sans toutefois se substituer à l'analyse normalisée des inertes (XP U44-164). Notamment le Bilan Matière ne donne pas d'informations sur les proportions relatives de ces inertes et sur leur dimension.

## DOMAINE D'APPLICATION

- fraction fermentescible des ordures ménagères (FFOM) avant compostage,
- déchets organiques issus du tri mécano-biologique (TMB) avant méthanisation (ou compostage),
- biodéchets issus des chaines de déconditionnement des déchets organiques emballés et destinés à une valorisation organique.

# COMPOST VERT : J'ETM UN PEU, BEAUCOUP, PAS DU TOUT

*Publié le 27 mars 2014*

Si les déchets verts, qu'ils soient compostés ou non, sont largement utilisés et valorisés en tant qu'amendements organiques normalisés, ils doivent avant tout respecter les critères d'innocuités fixés dans la norme NF U 44-051. Il s'agit de s'assurer que les apports de composts au sol n'entraîneront pas l'accumulation de métaux, ni de micropolluants organiques, ou encore ne comportent pas de risque de contamination microbiologique ou par des éléments indésirables. Bien que, contrairement à d'autres types de dénominations, les déchets verts entrant dans la fabrication des composts verts ne fassent pas l'objet de craintes particulières, il arrive parfois qu'ils présentent des teneurs en certains métaux supérieures à leurs valeurs limites imposées dans la norme, les rendant par conséquent non conformes. Le taux de dépassements observés sur ces produits reste néanmoins très faible (moins de 2 % des composts verts analysés), et concernent principalement l'arsenic, le chrome et le nickel (respectivement 0.9, 1.2 et 1.6 % des dépassements en 2013 (1) ). Toutefois, lorsque de fortes teneurs sont observées, elles sont problématiques pour les gestionnaires des sites de compostage. Mais d'où proviennent ces éléments trace métalliques (ETM) et comment y remédier ?
Cet article de l'AgroReporter traite des éléments traces métalliques que l'on retrouve parfois dans les composts de déchets verts, et tente d'en expliquer les origines.

## Retour aux origines

Le « zéro métaux » n'existe pas dans notre environnement. Deux grandes voies d'accumulation des ETM sont possibles : une origine humaine, liée aux activités minières et industrielles, et une origine naturelle, liée au fond géochimique local. Dans ce dernier cas, les pollutions par les métaux sont le fait de la dégradation des roches ou des émissions volcaniques. Les métaux provenant d'apports anthropiques sont présents sous des formes chimiques assez réactives et entraînent de ce fait des risques supérieurs aux métaux d'origine naturelle, qui se trouvent le plus souvent sous des formes relativement inertes dans les sols.
Les ETM ne sont pas biodégradables et sont donc susceptibles d'être transférés ou de s'accumuler (sol, eaux, végétaux, animaux).

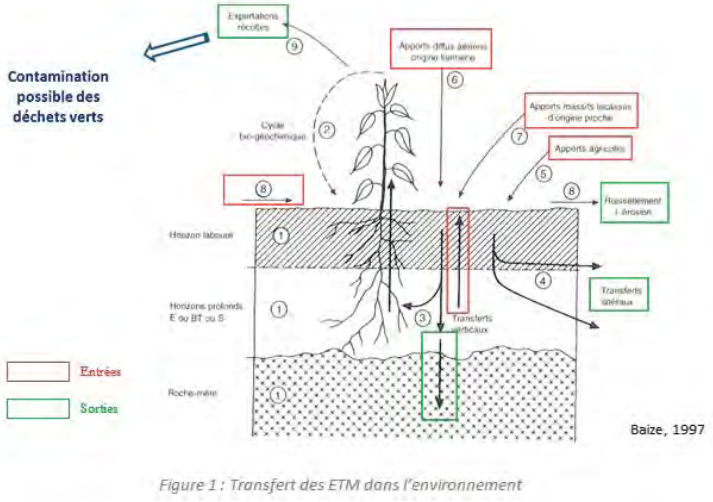



*Figure 1 : Transfert des ETM dans l'environnement*

## Des sources différentes selon l'élément

Les trois principales sources d'entrée des ETM sur les sols agricoles, en proportions variables selon les métaux, sont selon l'ADEME (rapport SOGREAH, 2007) :

• *Les engrais minéraux*, qui représentent respectivement 54% des entrées de cadmium, 42% pour le chrome et 44% pour le sélénium,
• *Les déjections animales*, totalisant 25% à 78% des entrées d'ETM en fonction des éléments,
• *Les retombées atmosphériques*, responsables de 5% à 33% en fonction des ETM, et le plus souvent de l'ordre de 10-15%. Elles représentent néanmoins l'essentiel de la source d'ETM en zone urbaine, en raison de l'activité industrielle et de la circulation des différents moyens de transport. À ces retombées d'origine anthropique, s'ajoute un "bruit de fond" naturel lié à l'érosion éolienne des sols et aux éruptions volcaniques.
Les boues et composts prennent une part relativement faible dans le total des quantités d'ETM entrant sur les sols agricoles français (autour de 4-8%) sauf le mercure (17%) et le plomb (20 %). Mais sur le total des quantités d'ETM apportés par les boues et composts, les composts de déchets verts concourraient à 60% des entrées d'arsenic, à environ 40-50% des entrées de Cd, Cr, Mo, Ni et Pb et à environ 15-25% pour les autres ETM. Malgré la faible proportion des composts verts présentant des teneurs supérieures aux valeurs limites retenues dans la norme NF U 44-051, ils représentent une part importante des entrées d'ETM du fait des quantités totales épandues chaque année.

## Pistes à suivre

En cas de présence problématique d'ETM dans l'environnement, la recherche des sources va se baser sur l'analyse des sources possibles. A titre d'exemples :
- **Cadmium : i**ndustrie des automobiles, avions, navires, domaine des constructions et des moyens de communications, engrais phosphatés, minerais, feux de forêts
- **Plomb** : industrie chimiques, sidérurgie, minerais, peintures, trafic automobile, huiles de vidange
- **Arsenic** : industries (traitement du bois, batteries électriques, équipements électroniques, industrie du verre, peinture…), combustion de produits fossiles, minerais, activité volcanique, feux de forêts
- **Zinc :** trafic automobile (usure des pneus), retombées atmosphériques, lisiers de porcs (médicaments enrichis), produits phytosanitaires
- **Cuivre :** lisiers de porcs (via une alimentation enrichie en cuivre), produits phytosanitaires, transport routier (usure des plaquettes de freins), transport ferroviaire (usure des caténaires), minerais
- **Nickel :** minerais, déjections animales
- **Mercure :** croûte terrestre, activité volcanique, certains geysers, combustion du charbon, incinération des déchets pollués, industries

(...)

(1) Sur la base de 434 échantillons de composts verts (dénomination n° 4 de la norme NF U 44-051), composts végétaux (dénomination n° 9) et composts de matières végétales (dénomination n° 10), analysés au LCA

(...)

## Des teneurs naturelles très variables

Qu'elles soient d'origine naturelle ou humaine, les contaminations des composts de déchets verts sont parfois liées au contexte local. Ainsi certaines régions sont-elles connues pour présenter régulièrement des teneurs naturellement élevées en certains éléments dans les sols (plus d'information : ici). Plusieurs exemples peuvent illustrer cette contamination d'origine naturelle mais nous ne nous attacherons dans cet article qu'à quatre éléments (plomb, arsenic, nickel et chrome) pris dans trois contextes différents (métropolitains ou non).

- **Exemple du plomb**

Les analyses menées sur le territoire français dans le cadre du Réseau de Mesure de la Qualité des Sols (RMQS) montrent que les teneurs totales en plomb sont comprises entre 3 et 624 mg/kg en surface pour les sols métropolitains. Dans les sols des Antilles, elles s'échelonnent entre 7 et 51 mg/kg en surface. La Figure 1 illustre bien la variabilité des teneurs mesurées.

*Figure 2 : Teneurs totales en plomb dans les sols mesurées sur la période 2000-2009, de 0 à 30 cm de profondeur. Source : Gis Sol (RMQS), 2009.*

Certaines concentrations élevées trouvent une origine naturelle. Ainsi, les mesures en profondeur montrent que les plus fortes teneurs totales en plomb sont situées dans les zones de contact entre les bassins sédimentaires et les massifs cristallins, notamment dans le Morvan, les Cévennes et certaines zones du Massif central. Les teneurs élevées dans le Poitou sont à relier aux sols ferrallitiques de cette région (« terres rouges »), également considérés comme anomalies naturelles.

- **Exemple de l'arsenic**

Les composts verts peuvent parfois présenter des teneurs plus élevées en arsenic en Vendée ou dans le Massif Central que dans d'autres régions. Les concentrations naturelles de cet élément, mais aussi son comportement dans l'environnement, en font un cas d'école particulièrement intéressant.
Les teneurs en arsenic des sols vendéens sont comprises entre 6 et 50 ppm (il est demandé moins de 18 pour le compost). Les zones où la concentration est la plus forte sont d'anciennes zones minières ou de carrières ; dans le Massif central la concentration dépasse 100 ppm par endroit. Mais une concentration élevée en arsenic n'entraine pas forcément un risque de toxicité. Celui-ci va notamment dépendre de la forme chimique sous laquelle il se trouve (on parle de « spéciation » en chimie). L'arsenic existe principalement dans les sols sous des formes oxydées, non toxiques : l'arséniate (AsO43-) et l'arsénite (AsO33-). Dans des conditions normales d'aération des sols, l'arséniate prédomine et présente un comportement voisin de l'anion phosphate (PO4-). Il se lie notamment très fortement aux composés du fer, de l'aluminium et du calcium, et demeure relativement plus mobile dans les sols sableux pauvres en matière organique. En conditions réductrices, l'arséniate est facilement transformé en arsénite, voire en arsine (AsH3), lorsque l'anoxie est maximale (sols hydromorphes, sols de rizières par exemple). Les formes réduites, toxiques, sont beaucoup moins fixées par le sol et leur mobilité, 4 à 10 fois supérieure à celle de l'arséniate, leur permet de migrer facilement vers les horizons profonds. Des transferts d'arsenic sur des distances plus ou moins longues sont ainsi possibles et les racines des végétaux peuvent se trouver en contact (et absorber) les eaux d'un bassin versant contaminé. Ce type de contamination a été démontré par exemple dans un bassin versant de l'Isle, comportant 9 sites miniers. L'arsenic s'accumulait dans les sédiments de fond de rivière qui, transportés par le courant vers l'aval, devenaient alors un stock potentiel d'arsenic après transfert vers la fraction aqueuse (Grosbois et al., 2006). Les extractions minières d'arsenic à l'échelle industrielle ont engendré dans certaines régions des surconcentrations de cet élément dans les eaux et les sols. Un phénomène comparable est observé dans les régions au long passé viticole, en raison de l'utilisation d'arséniates pour la protection du vignoble. Des quantités importantes d'arsenic (et de sélénium) sont ainsi apportées par l'eau d'irrigation.

- **Exemple du nickel et du chrome sur l'île de la Réunion**

Une étude menée en 2006 par la MVAD(1) a révélé la présence de chrome et de nickel dans les composts verts réunionnais. Les sols de ce département d'outre-mer présentent des caractéristiques particulières et sont très riches en chrome, cuivre, nickel et zinc. Ces teneurs sont donc corrélées à la composition des roches mères de l'île : la source est ici naturelle. Cependant, si les métaux sont présents en quantités importantes, ceux-ci sont normalement peu mobiles dans la solution du sol. Dans ce cas précis, une deuxième étude a pu démontrer que la proportion des ETM amenés par les végétaux est très faible, (environ 2% pour Cr et Ni). La raison de ces accumulations se trouve dans les résidus (poussière, terre, ...) déposés à la surface des végétaux, particulièrement riches en ETM. En termes de volume, les mottes de terre apportées dans le process de compostage représenteraient moins de 3 % du volume total des végétaux. Mais du fait de la densité de la terre, plus importante que la densité des végétaux, les concentrations élevées en Cr et Ni des composts réunionnais s'expliqueraient donc par la présence de petites quantités de sol naturellement riche en ETM. Ainsi, dans le cas présent, une solution consisterait à éliminer les mottes de terre avant broyage des déchets verts, ou de laver les végétaux avant compostage, pour obtenir des concentrations plus faibles en ETM dans le compost.

## Des sensibilités aux ETM liées :

Les exemples précédents montrent que les stocks en éléments traces dans les sols ne sont, naturellement ou non, pas les mêmes à l'échelle locale, nationale ou encore mondiale. Les teneurs dans les sols, si elles ont une importance, ne sont pas suffisantes pour évaluer les risques de transfert à l'intérieur même du sol et au-delà, dans les eaux et les végétaux. La mobilité de l'élément, ou son potentiel de transfert, doit être prise en considération.
(...)

**(...)**

Les paramètres suivants vont avoir une influence dans le transfert d'ETM du sol à la plante :

- La nature de l'ETM : le sol est une matrice complexe qui exerce un effet tampon important sur les équilibres entre les ETM du sol et ceux en solution. Ce comportement des métaux dans un sol est différent selon l'élément considéré. Dans un même sol, les ETM n'ont pas tous la même mobilité

*Classement des éléments selon la mobilité croissante (tendance générale)*

- **Les caractéristiques physico-chimiques du sol :** le potentiel de transfert des ETM va dépendre des conditions du milieu (aération), du pH du sol (un milieu acide favorise généralement leur migration, à l'exception de l'arsenic, sélénium et molybdène). Certains matériaux favorisent a contrario leur stabilité : les sols riches en matières organiques, en argiles, en oxydes fixent les métaux dans des complexes. Mais cette fixation est plus ou moins réversible et peut ainsi constituer un stock d'ETM potentiellement relargables.

- **Le végétal :** plusieurs études montrent l'absence de lien direct entre la teneur totale en ETM dans le sol et leur concentration dans les végétaux. Certaines plantes sont capables d'accumuler les métaux, tandis que d'autres ont une meilleure « résistance » et ne les absorbent pas ou peu. En règle générale, les légumes « feuilles » emmagasinent plus facilement les métaux que les légumes racines, qui sont eux-mêmes plus sensibles à l'accumulation que les céréales.

Si les végétaux arrivant sur une plate-forme de compostage sont pollués par des métaux, suivant leur niveau de contamination et selon la durée de compostage, le produit obtenu en fin de process peut-il être malgré tout conforme aux exigences requises ?

## Devenir des ETM au cours du compostage

Au cours du compostage, il peut se produire un phénomène de concentration des métaux, puisqu'il y a une perte de matière organique alors que les éléments minéraux ne sont pas « dégradés ».

Toutefois, les fractions des métaux subissent également des changements, sous l'influence de l'activité bio-chimique. Différentes populations microbienne se succèdent au cours du compostage, et contribuent aux modifications chimiques ou physiques. Ainsi, une augmentation des surfaces d'adsorption résulte de cette activité, entraînant un changement de la distribution des métaux dans les différents compartiments du compost. La réactivité des ETM évolue avec l'état de maturité de la matière organique (MO) du compost. Dans un compost jeune, les MO sont instables, pauvres en substances humiques et ne possèdent pas suffisamment de groupes fonctionnels (carboxyles, carbonyles, groupes aromatiques…) qui leur permettraient de retenir une quantité importante de métaux. La prolongation de la phase de maturation jusqu'à 6 mois joue un rôle significatif dans la stabilisation et l'humification des MO. Les acides humiques formés à 6 mois semblent retenir une forte proportion d'ETM : les liaisons ETM-MO sont favorisées par des groupements carboxyliques et aromatiques apparus au cours du compostage. La labilité des ETM dans le compost jeune peut constituer un risque de transfert dans l'environnement. Prolonger la maturation du compost permet d'augmenter la stabilité des liaisons ETM-MO et réduire la mobilité des ETM. Ceci est particulièrement observé pour les composts d'ordures ménagères. Toutefois, cette complexation des métaux aux substances humiques néoformées est réversible pour certains métaux (Zn et Cd par exemple, qui présentent une ré-augmentation de l'extractabilité au cours de la maturation des composts). Des études réalisées sur cette distribution des métaux dans les différentes fractions montrent qu'en moyenne, la majorité des métaux lourds se retrouve dans la fraction résiduelle sous une forme inerte et représente 70 à 80 % des teneurs totales en métaux.

***Les concentrations en ETM mesurées dans les composts verts sont la résultante de plusieurs composantes. Dans le cas d'une contamination, les moyens de remédiations sont rares et généralement inaccessibles aux fabricants de composts verts, pour des raisons économiques. Il reste néanmoins possible de rechercher à éliminer ou à réduire l'impact d'une source de pollution, par la recherche des causes ou la modification du process.***
***Les agronomes du LCA sont à votre disposition pour toute information complémentaire.***

# LA TRAQUE AUX TRACES ORGANIQUES

*Publié le 10 juillet 2014*

Qu'ils aient une origine anthropique ou naturelle, des types très divers de micropolluants organiques (MPO) sont présents dans l'environnement. Ils peuvent se retrouver dans les produits organiques valorisés en agriculture, par l'intermédiaire des matières premières mises en œuvre. Ces micropolluants sont potentiellement dégradables, car de nature organique, mais les vitesses de dégradation sont très variables selon les composés : de quelques jours à plusieurs dizaines d'années… La toxicité de certains, et leur persistance dans l'environnement, expliquent pourquoi certains MPO sont surveillés dans les produits organiques. Les différentes réglementations imposent des valeurs limites à ne pas dépasser, en fonction de la nature du produit concerné et du cadre de son utilisation.
Pour compléter l'article de l'Agro Reporter paru le 27/03/14 (relire) qui traitait des ETM dans les composts de déchets verts, nous abordons cette fois la problématique des MPO que l'on peut retrouver dans les composts et les boues.

## Que traque-t-on ?

Encore appelés Composés Traces Organiques (CTO), les MPO sont potentiellement présents dans les produits synthétiques, sous-produits utilisés par l'industrie ou à des fins domestiques.
Ils regroupent plusieurs types de composés contenant un ou plusieurs atomes de carbone. On peut distinguer deux grandes familles : les pesticides et les autres micropolluants organiques. Ces derniers comprennent notamment les hydrocarbures (dont les HAP), les PCB, les dioxines et furannes (PCDD/PCDF), les détergents, les retardateurs de flammes (PBDE), les imperméabilisants (PFC), les molécules médicamenteuses…
La plupart de ces composés entrent dans la composition de produits d'usage courant et sont donc susceptibles de se retrouver dans nos déchets et nos eaux usées, puis dans les boues, du fait de leur affinité pour la matière organique. Leur présence est donc principalement liée à l'action de l'homme, quoique certains polluants puissent avoir une origine naturelle.
Les réglementations françaises actuelles sur les boues et les composts n'imposant des seuils que sur les 7 PCB et/ou les 3 HAP les plus communs, dans cet article nous n'évoquerons pas les autres types de micropolluants organiques susceptibles d'être présents, ceux-ci étant de ce fait rarement analysés dans ces matrices. Toutefois, les substances prioritaires à surveiller sont toujours susceptibles d'être modifiées à l'occasion des révisions réglementaires au niveau européen.

| Famille | Composé ou congénère | Valeur limite réglementaire (en mg / kg de MS) | Flux limite annuel moyen sur 10 ans (en g / ha) |
|---|---|---|---|
| HAP | Fluoranthène | 5[1] / 4[2] | 7.5[1] / 6[2] |
| | Benzo(b)fluoranthène | 2.5[1],[2] | 4[1],[2] |
| | Benzo(a)pyrène | 2[1] / 1.5[2] | 3[1] / 2[2] |
| PCB | Total des 7 principaux PCB (28 + 52 + 101 + 118 + 138 + 153 + 180) | 0.8[3] | 1.2[3] |

*(1) Valeur maximale applicable aux boues (arrêté du 08/01/1998) dans le cas général (épandage hors pâturage)*
*(2) Valeur maximale applicable aux boues épandues sur des pâturages (arrêté du 08/01/98), aux amendements organiques NF U44-051 et aux composts de Miates NF U44-095*
*(3) Valeur maximale applicable aux boues épandues sur toutes cultures (arrêté du 08/01/98) et aux composts de Miates NF U44-095*

Tableau 1 : Valeurs limites réglementaires en HAP et PCB, et flux annuel moyen à ne pas dépasser sur 10 ans, pour les boues et les amendements organiques (France). La méthode d'analyse requise est la norme XP X33-012.

## Origine et danger toxicologique des HAP et PCB

**Les Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques** (HAP) sont présents dans l'environnement du fait de différents processus dont : la biosynthèse par des organismes vivants (1) , les pertes à partir du transport ou de l'utilisation des carburants fossiles, la pyrolyse des matières organiques à haute température, la combustion des charbons et pétroles. Ce dernier processus constitue la principale voie d'introduction des HAP dans l'environnement.

Comme illustré par la Figure 1, la principale source de HAP est le secteur résidentiel, qui représente encore près des deux tiers des émissions mais qui continue à baisser. Le transport routier participe significativement, avec 30% des émissions de HAP en 2011, en particulier les véhicules diesel dont la proportion est en augmentation dans le parc automobile. À l'échelle locale, les tendances peuvent être fortement différentes.

Un certain nombre de ces composés sont cancérigènes, en particulier les trois HAP retenus dans l'arrêté du 8/01/1998 (épandage des boues) ou dans les normes des amendements organiques : fluoranthène, benzo(b)fluoranthène et benzo(a)pyrène. Il s'agit de HAP dits « pyrogéniques » (produits par combustion de matière organique, combustibles fossiles ou bois), par opposition aux HAP « pétrogéniques » (hydrocarbures d'origine naturelle, présents dans les bruts pétroliers, qui se caractérisent par une forte proportion d'hydrocarbures ramifiés).
D'après leurs caractéristiques biochimiques, une fois émis dans l'atmosphère, ces composés vont avoir tendance à s'accumuler dans les différents compartiments solides de l'environnement (sols, sédiments, matières en suspension).

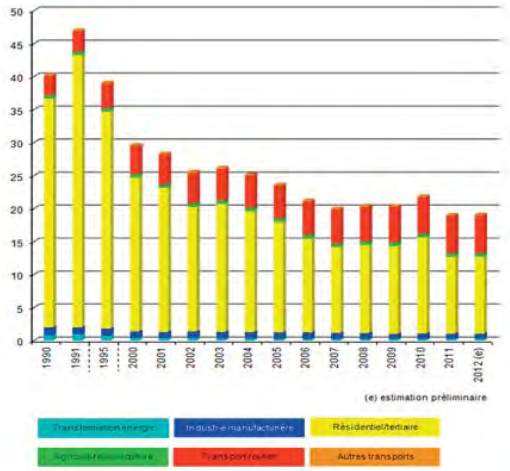



Figure 1 : Émissions des HAP par secteur en France métropolitaine en tonnes (Source : CITEPA, 2013)

**Les polychlorobiphényles (PCB),** aussi appelés biphényles polychlorés, forment une famille de 209 composés aromatiques organochlorés dérivés d'un hydrocarbure aromatique polycyclique, le biphényle. Ils sont également cancérigènes, au même titre que les dioxines (PCDD) et furannes (PCDF) de la même famille. Ce sont des substances huileuses ou solides à forte inertie thermique, aujourd'hui interdits d'utilisation, mais que l'on peut encore trouver dans les anciens matériels où ils pouvaient servir d'isolants électriques, dans les transformateurs comme fluide hydraulique ou comme plastifiant dans certaines résines. On les retrouve aussi dans les condensateurs, les peintures, certains plastiques, les fours à micro-ondes….

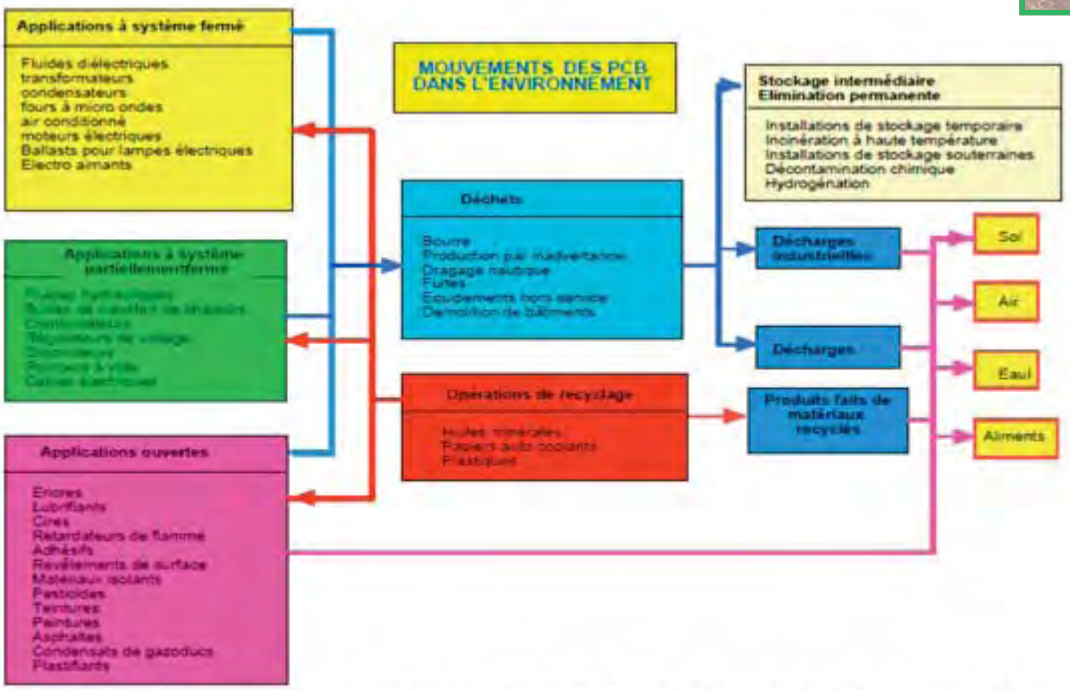



Figure 2 : Différentes sources industrielles de PCB en fonction du type d'application (Source : Nations Unies -PNUE, 2001)

PCB et HAP font partie des Polluants Organiques Persistants (POPs), définis lors de la Convention de Stockholm. Ce sont des substances organiques qui : i) possèdent des caractéristiques toxiques, ii) sont persistantes, iii) sont susceptibles de bioaccumulation, iv) peuvent aisément être transportées dans l'atmosphère au-delà des frontières sur de longues distances et se déposer loin du lieu d'émission et enfin v) risquent d'avoir des effets nocifs importants sur la santé et l'environnement aussi bien à proximité qu'à une grande distance de leur source.

| | Origine des polluants | Principales caractéristiques |
|---|---|---|
| **PCB**<br>Polychlorobiphényles | ▫ Il n'existe pas de PCB d'origine naturelle<br>▫ Utilisations principales : encres d'imprimerie, peintures, isolants des transformateurs électriques<br>▫ Interdits depuis 1987. L'échéance finale pour l'élimination des appareils pollués au-delà de 500 ppm est fixée, pour l'ensemble de l'Union européenne, au 31 décembre 2010. | ▫ Faible volatilité,<br>▫ Haute stabilité thermique,<br>▫ Forte résistance à l'oxydation<br>▫ Peu solubles dans l'eau mais forte affinité pour la MO<br>▫ Lentement biodégradables |
| **HAP**<br>Hydrocarbures aromatiques polycycliques<br>Fluoranthène<br>Benzo(a)pyrène<br>Benzo(b)-fluoranthène | ▫ Origine naturelle : feux de forêt, éruptions volcaniques.<br>▫ Source principale d'émission : activités humaines (combustions incomplètes à hautes températures, produits pétroliers, combustion des carburants des véhicules et de chauffage, sidérurgie, production d'aluminium) | ▫ Composés non polaire, stables et ayant une faible volatilité : hydrophobes et persistants (fonction de leur masse molaire)<br>▫ Forte affinité pour la MO<br>▫ Sensibles à la photolyse<br>▫ Lentement biodégradables, mais vitesse variable selon les composés |

Tableau 1 : Synthèse des principales sources et caractéristiques des MPO (Source : Laboratoire LCA)

## Des concentrations différentes selon le type de produit

Les voies de contamination des composts et des boues par les MPO sont variées (2). La déposition atmosphérique et l'application de produits phytosanitaires représentent les voies de pénétration les plus importantes. La contamination des eaux et la déposition atmosphérique peuvent être à l'origine de l'apport de MPO dans les boues d'épuration. Quant aux engrais de ferme, ils ne sont pas exempts de ces substances, dont la provenance peut être liée à l'utilisation des médicaments vétérinaires, ainsi que de dépôts atmosphériques.

La déposition atmosphérique constitue en réalité la voie prépondérante de contamination des déchets organiques et des composts par les MPO. Les teneurs de ces substances dans les composts provenant de régions urbaines peuvent être plus élevées que ceux provenant de régions rurales. Toutefois, une grande majorité des produits organiques présente des concentrations en MPO très inférieures aux seuils réglementaires.

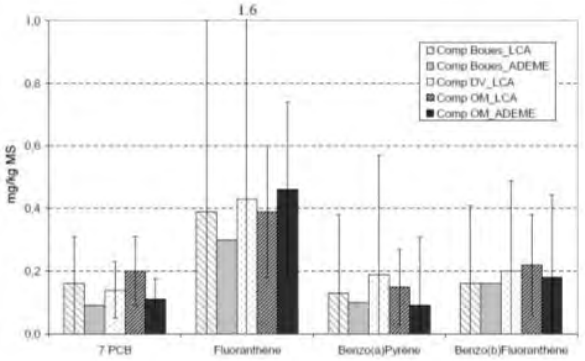



Tableau 2 : Teneur des composts en HAP et PCB en moyenne (histogrammes) et écart type (barres). (Source : Guillotin et Jordan-Meille, Colloque Gemas-Comifer, Blois 2007 ; Base de données LCA sur plus de 5 000 échantillons)

## Comportement des MPO durant le compostage

Des études sur la dégradation des MPO pendant le compostage indiquent que les HAPs peuvent être dégradés durant cette étape, alors que les quantités de PCBs ou de dioxines et furannes restent plutôt inchangées (substances peu dégradables). Les HAPs sont minéralisés ou transformés par des processus biologiques. Dans certains cas, les métabolites créés peuvent être plus toxiques que leurs substances-mères. Une partie de ces composés peut s'adsorber fortement à la matière organique et devenir indétectable par les méthodes analytiques usuelles. Toutefois, étant fortement adsorbée à la MO, cette fraction n'est pas ou peu disponible pour les organismes terrestres (2) .

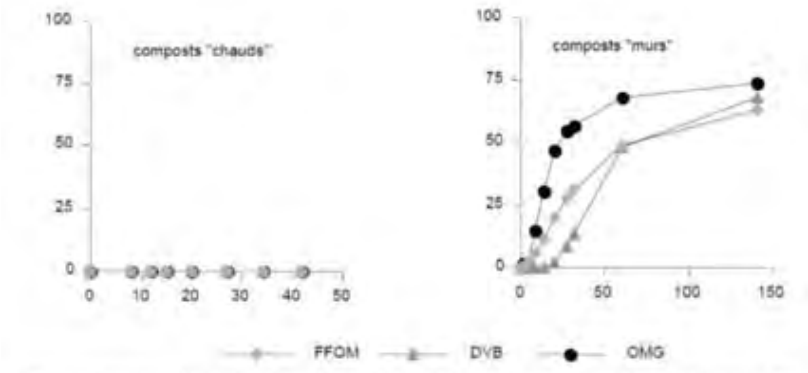



Figure 3 : Cinétique de minéralisation du 14C-fluoranthène dans des composts prélevés en phase de fermentation (composts « chauds ») et en phase de maturation (composts « mûrs »)
En abscisse : temps (j) ; en ordonnée : $^{14}C$ - $CO_2$ (% $^{14}C$ initial).

D'autres études ont montré que lorsque la dégradation de la matière organique est plus rapide que la dissipation du polluant, la concentration en ce polluant augmente au cours du compostage : le pourcentage de dissipation est dans ce cas négatif, par un effet de concentration.
La biodégradation des MPO semble principalement réalisée par co-métabolisme, ce qui signifie que les microorganismes ne retirent aucun bénéfice (source d'énergie ou de matière) du métabolisme des MPO (3) .
Ces observations confirment d'autres essais montrant que la stabilité de la matière organique des composts conditionne le devenir des MPO après l'épandage. Des incubations réalisées dans le cadre du suivi des micropolluants après épandage (4) ont montré qu'en cas d'apport de compost dont la matière organique est bien stabilisée, la présence d'une microflore spécifique permet l'épuration d'une proportion non négligeable de fluoranthène.

## Et le devenir des MPO après retour au sol ?

Selon les études menées (programme QualiAgro INRA), aucun effet de l'apport des produits résiduaires organiques (composts, effluents de fermes…) n'est visible dans les récoltes. De plus, les concentrations des récoltes ne sont pas en lien avec les concentrations de MPO dans le sol : les MPO les plus abondants dans le sol, ne sont pas les plus abondants dans les récoltes.
Une partie importante de ces substances distribuées sur les sols suite à l'épandage de composts est dégradée ou adsorbée aux particules du sol. L'apport de matière organique par application de compost devrait réduire la biodisponibilité des MPO présents dans le sol et ainsi limiter les effets toxiques.

## Au laboratoire

Il faut souligner que les méthodes d'analyses de certains composés organiques sont encore en développement et ne sont pas standardisées actuellement. Le laboratoire doit être capable de travailler dans des gammes de concentrations larges (en cas de pollution) tout en atteignant des limites de quantification faibles (µg/kg, voire pg/kg). Les difficultés analytiques sont dues aussi à la complexité des matrices étudiées qui se traduisent par ce qu'on appelle « effets matrices » et de la capacité technique à pouvoir identifier puis quantifier le polluant, par GC/MS-MS ou LC/MS-MS par exemple. Pour les HAP et PCB en revanche, il existe une méthode standardisée. Relire l'article sur le dosage des MPO au LCA. Le Laboratoire LCA est d'ailleurs accrédité par le Cofrac pour l'analyse de ces composés traces dans les boues (Programme 156) et dans les amendements organiques et supports de culture (Programme 108).

(1) Krauss, M. ;Wilcke, W. ;Martius, C. ; Bandeira, A.G. ;Garcia, M.V.B., Amelung, W.(2005). Atmospheric versus biological sources of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in a tropical rain forest environment. Environmental Pollution, 135, 143-154.
(2) « Présence et importance des micro-polluants organiques dans le compost, le digestat et les déchets organiques – Étude bibliographique. Rapport final du module 1 du projet micro-polluants organiques dans le compost et le digestat en Suisse ». R. Brändli, T. Kupper et al. Novembre 2004.
(3) Lashermes, G (2010). Évolution des polluants organiques au cours du compostage de déchets organiques : approche expérimentale et modélisation » (Thèse de doctorat, AgroParisTech, FRA).
(4) Vergé-Leviel, C. (2001). Les micropolluants organiques dans les composts d'origine urbaine: étude de leur devenir au cours du compostage et biodisponibilité des résidus après épandage des composts au sol (Thèse de doctorat, Institut National Agronomique Paris-Grignon, FRA) inhttp://www7.inra.fr/dpenv/pdf/houaud25.pdf

# SUBSTRATS SOUS CONTRÔLE

*Publié le 7 juin 2012*

Les plantes ont des besoins spécifiques pour leur développement. De plus, chacune d'elles a une tolérance plus ou moins grande à l'acidité et la salinité. Pour ajuster l'apport d'engrais aux besoins des plantes, chaque producteur doit contrôler le pH et la conductivité de son substrat en pépinière hors-sol.

pH et assimilabilité des éléments

## ON DISTINGUE DEUX CATÉGORIES DE PLANTES :

**> Les plantes acidophiles** ou plantes dites de terre de bruyère qui exigent un milieu au pH < à 5.5 et dépourvu de calcaire total.
Exemple : camélias, rhododendrons, hortensias,…

**> Les plantes neutrophiles** qui peuvent supporter une large gamme de pH (par convention entre 6 et 6.5)
Exemple : géraniums, surfinias, chrysanthèmes…

## SIGNIFICATION DE LA CONDUCTIVITÉ

La conductivité permet de mesurer la concentration en ions de la phase liquide d'un substrat.

En se solubilisant, les engrais apportés au substrat s'ionisent, et augmentent ainsi sa conductivité.

L'unité de mesure de la conductivité est le mS/cm (milli-Siemens par centimètre).

## POUR LES FABRICANTS ET LES LABORATOIRES, UNE SEULE MÉTHODE

Comme il est difficile de mesurer directement le pH et la conductivité d'un substrat, les chimistes et les agronomes ont décidé d'augmenter le volume d'eau du substrat pour en faire un milieu liquide qui permette une mesure plus aisée de ces deux paramètres.

Les fabricants et les laboratoires doivent respecter des procédures normalisées pour caractériser les supports de culture. En France, jusqu'en février 2000, la méthode française en vigueur (NF U 44-172) pour mesurer le pH et la conductivité consistait à ajouter un volume et demi d'eau à un volume de substrat préalablement amené à pF1 (capacité maximale de rétention en eau du substrat).

Dans le cadre d'une nouvelle normalisation européenne des supports de culture, de nouvelles normes analytiques ont été établies en 2000. La détermination de la conductivité (NF EN 13038) et du pH (NF EN 13037) est maintenant réalisée à partir d'un extrait aqueux dilué 5 fois. Par ailleurs, il n'est pas nécessaire de modifier au préalable l'humidité du substrat.

Le référentiel de valeurs que les professionnels avaient l'habitude d'utiliser a donc été modifié.
Pour la plupart des supports de culture, le pH mesuré selon la méthode européenne est plus élevé de quelques décimales par rapport au pH mesuré selon la méthode française.
La conductivité selon la méthode européenne est plus faible (divisée par 2 à 2,9).

Les méthodes utilisées avant février 2000 permettaient de bien comparer les terreaux entre eux, car la mesure se faisait à humidité constante, alors que la méthode européenne se fait à humidité variable (l'humidité du produit peut varier au cours de l'année, lors de la fabrication du substrat et selon le moment où est réalisé le prélèvement).

Quelque soit la méthode utilisée, le plus important est de pouvoir donner une signification à ces valeurs, en sachant que les mesures de pH et de conductivité réalisées sur des extraits aqueux de substrat donnent une image déformée des conditions du milieu.
En ajoutant de l'eau à un substrat, on dilue sa phase liquide et on diminue donc la concentration en ions H3O+ et en ions nutritifs issus des engrais. Les mesures de pH et de conductivité de cette « suspension » de substrat, appelée aussi « extrait », sont donc différentes de celles qui pourraient être réalisées directement dans la phase liquide : le pH est plus élevé et la conductivité est plus faible.

Au-delà de ces deux mesures de base de suivi de la production, le laboratoire LCA est en mesure de réaliser toutes les déterminations exigées par la réglementation sur les supports de culture (analyses physico-chimiques, éléments traces métalliques, microbiologie).

***N'hésitez pas à nous contacter.***

# LE POINÇONNEUR DES SUBSTRATS

*Publié le 15 mars 2012*

Serre de cyclamens à Sainte-Gemmes-sur-Loire (Maine-et-Loire).
© Pascal Xicluna / Ministère de l'Agriculture et de la Pêche

Devant l'abondance de l'offre de substrats, le producteur hors-sol est le plus souvent désarmé pour réaliser son choix. Les critères subjectifs et économiques sont souvent de mise. Il n'existe généralement pas de mauvais substrat. Il est plus fréquent de rencontrer de mauvaises utilisations.

## APPROCHE GLOBALE

Le choix d'un substrat nécessite de prendre au préalable en compte les exigences des cultures, les contraintes d'irrigation, de fertilisation et de technicité de l'entreprise. En fonction de ces renseignements, il sera possible de réaliser une sélection basée sur les caractéristiques propres des substrats. Parmi celles-ci, les caractéristiques physiques tiennent une place particulière. Le substrat est le lieu de développement du système racinaire. Il est primordial que les conditions nécessaires à son bon fonctionnement métabolique soient réunies. Ainsi, l'aptitude au renouvellement du milieu en oxygène, sa capacité à assurer une alimentation hydrique (et la conséquence sur le pilotage de l'irrigation) sont autant de facteurs qu'il importe de connaître au mieux.
Malheureusement les utilisateurs s'attachent le plus souvent à la seule fertilisation de leurs supports de culture en oubliant de s'intéresser à leurs caractéristiques physiques. Elles peuvent être obtenues auprès du fournisseur (Norme AFNOR / Etiquetage). Vous pouvez également les obtenir en faisant analyser le produit au Laboratoire.

## ANALYSES PHYSIQUES AU LABORATOIRE

Le passage en revue des déterminations réalisées au LCA est l'occasion de traiter quelques cas de figure et leurs conséquences possibles sur la conduite des cultures.

**> Analyse de la porosité** : Elle correspond à la mesure des vides d'un substrat. La porosité est occupée par deux fluides : l'air (essentiel à la respiration racinaire) et l'eau (qui assure la fourniture pour l'alimentation hydrique). A un litre de substrat correspond une porosité en volume. L'ordre de grandeur de cette porosité est de 80 à 95 % pour les substrats horticoles. Du fait des possibilités de tassement des substrats, on parle de porosité « apparente », qui est proche de la porosité réelle.

**> La densité apparente sèche** : Elle correspond à la masse de l'unité de volume à l'état sec (poids d'un litre de substrat sec). Elle varie habituellement entre 0.008 et 0.4 kg/L. Plus la densité apparente sèche est faible, plus la porosité est forte (plus le substrat contient des vides susceptibles de contenir de l'eau et/ou de l'air), et inversement. Afin de privilégier le volume de substrat exploré par les racines de la plante, on a tout intérêt à travailler avec un terreau léger (faible densité apparente = porosité élevée). Pour les plantes sensibles à l'asphyxie, comme le Poinsettia par exemple, on privilégiera un substrat bien aéré permettant un bon renouvellement de la phase gazeuse. Mais attention : il faut alors pouvoir bien maîtriser l'irrigation !

**> L'eau et l'air retenus à pF1.0** : Les plantes ont la faculté d'extraire l'eau présente dans le support de culture grâce à leurs racines. Toutefois, moins il y a d'eau dans le support, plus la force de succion exercée par les racines doit être importante et plus l'eau est difficile à extraire pour la plante. Les laboratoires savent reproduire ce phénomène de succion. C'est la notion de potentiel hydrique (pF : potentiel of Free energy). La mesure de l'humidité à pF1, correspond à la capacité en bac qui équivaut environ à la capacité maximale de rétention en eau par le substrat. Il est nécessaire de mettre en rapport cette capacité de rétention en eau avec le contenant : c'est une mesure moyenne. En effet, dans un pot, un substrat est toujours plus humide en bas du pot qu'en haut.

Un autre problème se pose alors : à la capacité en bac, quelle place reste-t-il pour l'air dans la porosité totale du substrat ? Au maximum d'eau retenue par un substrat correspond un minimum d'air : en reste-t-il assez pour assurer une respiration racinaire optimale ? A pF1, le maximum acceptable pour un substrat est une humidité de 80 à 85 %. Cela correspond alors au seuil minimum acceptable de capacité en air qui est de 15 à 20 %. Généralement, on considère qu'un substrat aéré présente une capacité en air à pF1 supérieure à 15 à 20 %. La difficulté consiste à trouver le bon équilibre air/eau connaissant la sensibilité plus ou moins marquée de la plante à l'asphyxie racinaire. Dans le cadre de la culture de plantes sensibles ou de production de jeunes plants, des substrats à teneur en air à pF1 élevée sont souhaitables.

**> La disponibilité en eau :** Une capacité en bac élevée est intéressante, mais encore faut-il que l'eau retenue soit disponible pour les racines. Plus les fibres du terreau sont fines, plus l'eau est retenue. Comme il a déjà été précisé auparavant, moins il y a d'eau dans un substrat, plus les racines extraient l'eau difficilement et plus la succion qu'elles doivent exercer est forte. Si la mesure de l'humidité à pF1 correspond environ à la capacité en bac, la mesure de l'humidité à pF2 permet de doser la quantité d'eau présente non accessible aux racines. Elle correspond à la force maximale de succion pouvant être exercée par les racines.
La disponibilité en eau correspond alors en la différence DE = humidité à pF1 – humidité à pF2 (en mL/L ou en % volumique).

Les paramètres physiques mesurables en laboratoire servent non seulement à caractériser le terreau mais peuvent aussi être d'une aide précieuse pour gérer l'irrigation ou pour comprendre le comportement du terreau au cours de la culture.

Conduire des cultures, c'est maîtriser des paramètres importants tels que la qualité des jeunes plants, la fertilisation, la protection phytosanitaire, le climat. Mais, pour le chef de culture, c'est aussi et peut-être avant tout, la gestion de l'eau et de l'air, elle-même fortement influencée par les propriétés physiques du support... Dans cet article, nous détaillons ce dernier point pour comprendre l'importance d'une analyse physique de substrat.

## LE CHOIX DU POT DÉPEND DU TERREAU

La conduite de l'irrigation doit impérativement tenir compte du binôme pot / terreau propre à la production. En effet, plus le contenant est petit, plus il faut un terreau fin, et plus le risque de manque d'air est élevé. Paradoxalement, les contenants de faible hauteur ne sont donc pas exempts de

TENEUR EN AIR ET HAUTEUR DE POT
Hauteur = 10 cm
Teneur en air en %
de 0 à 3 cm 22.3
de 3 à 7 cm 6.9
de 7 à 10 cm 3.7
Hauteur = 20 cm
de 0 à 5 cm 34.2
de 5 à 10 cm 30.8
de 10 à 15 cm 20
de 15 à 20 cm 4
Source Hydro Agri Spécialités

risque d'asphyxie. Aussi, est-il plus facile de travailler avec des pots plus hauts afin d'améliorer la gestion de l'air dans les pots.

[...]

[...]

Culture de Poinsettia sous serre

A l'opposé, l'utilisation d'un terreau plus grossier rend la gestion de l'air plus facile mais diminue d'autant la réserve en eau.

## IRRIGATION : VOLUME ET FRÉQUENCE DÉPENDENT DU TERREAU

Le type de culture a aussi son importance. Pour le Poinsettia par exemple, végétal sensible à l'asphyxie, le choix d'un substrat à porosité et à teneur en air à pF 1 élevées s'impose. La disponibilité en eau sera alors faible. D'où la nécessité de pratiquer des irrigations moins importantes en volume, mais à fréquence plus élevée, pour assurer une nutrition hydrique optimale de la plante.

Le calcul de la dose d'arrosage des pots peut se faire à partir des résultats de capacité de rétention en eau à pF 1 et 1.7. L'humidité à pF 1.7 est l'humidité qui sert au déclenchement de l'irrigation, sous peine de réduire la croissance, sans pour autant arriver au point de flétrissement.
La capacité de rétention en eau à pF 1 est la limite maximum d'arrosage.

Il n'est pas toujours possible d'obtenir une grande précision dans ces mesures. Mais les ordres de grandeurs ainsi déterminés sont très utiles au pilotage de l'irrigation.

Ainsi, comme dans l'exemple ci-contre, on peut calculer la disponibilité en eau par pot en multipliant la disponibilité en eau du substrat par le volume du pot en litres.

En pépinière, on peut considérer que la dose d'arrosage pour assurer une nutrition hydrique exempte de stress se situe au tiers de la disponibilité en eau du substrat. Dans notre exemple, elle serait de 79 ml/litre de substrat.

En irrigation par aspersion, les pertes en eau sont importantes. On parle souvent de coefficient de captage, traduisant le pourcentage de l'aspersion effectivement captée par les plantes. Il varie de 40 à 80 % de l'eau apportée par aspersion en fonction de la densité et du végétal : certains ont un feuillage adapté pour capter l'eau et la diriger vers le tronc (comme une gouttière), alors que d'autres l'écartent (à l'image d'un parapluie).

## EVOLUTION DES SUBSTRATS EN COURS DE CULTURE

Exemple :
Pour un substrat dont les caractéristiques seraient les suivantes :
- Humidité à pF 1 = 66,9 %
- Humidité à pF 1,7 = 43,2 %

La disponibilité en eau serait de (66,9 – 43,2) = 23,7 % ou 237 ml d'eau par litre de substrat.
Le volume minimal à apporter pour évitement du stress hydrique est de 237 / 3 = 79 ml d'eau par litre de substrat.

Nous avons pu voir que l'analyse physique permet de caractériser un support de culture notamment avant utilisation. Elle permet aussi de cerner le comportement et l'évolution du substrat en cours de culture.

Les substrats organiques sont des milieux vivants susceptibles d'évoluer dans le temps en fonction des saisons, des modes d'irrigation et de la colonisation racinaire.

Ainsi, un producteur effectuant une analyse physique en cours ou en fin de culture pourra vérifier si les caractéristiques du substrat ont évolué ou pas. Une diminution de la teneur en air à pF 1, une teneur en eau à pF 2 qui augmente, une disponibilité en eau qui diminue sont autant d'indicateurs d'une dégradation du substrat (production de fine notamment avec les tourbes). Il convient alors de corriger les doses d'arrosage, au risque de voir le rapport Air/Eau du substrat à pF 1 baisser et de s'exposer à une asphyxie plus ou moins marquée des racines de la plante. Dans le cadre de cultures devant séjourner longtemps dans le même pot, comme les pieds mère de Géranium par exemple, ce suivi est particulièrement utile.

*Un terreau peut posséder de très bonnes qualités chimiques mais donner des résultats décevants en culture :*
*- s'il n'est pas suffisamment aéré,*
*- ou si la conduite de l'irrigation n'est pas en adéquation avec sa disponibilité en eau.*

*En effet, l'assimilation des éléments minéraux est sous la dépendance du bon fonctionnement des racines, qui ont besoin de conditions favorables à leur respiration et hydratation.*

*L'analyse physique du substrat, réalisable au laboratoire LCA (accrédité par le COFRAC pour cette mesure), est donc un complément quasiment indispensable de l'appréciation de sa composition chimique. Elle permet au producteur d'avoir une bonne connaissance de ses propriétés physiques (aération notamment), sur lesquelles il est difficile d'intervenir en culture, et donc de mettre en adéquation les exigences de ses plantes et le comportement de son substrat. Elle est aussi une aide précieuse en termes de critère de choix du produit, notamment en rapport avec les contraintes d'irrigation de l'exploitation. Enfin, elle est un outil de contrôle fiable de l'évolution du support de culture : elle permettra le cas échéant d'adapter l'irrigation en conséquence afin d'éviter des phénomènes d'asphyxie racinaire.*

# FERTILISATION ORGANIQUE DES SUBSTRATS

*Publié le 14 février 2014*

L'efficacité des engrais organiques azotés pour les cultures de pleine terre est de mieux en mieux connue, grâce aux nombreux essais de plein champ et aux tests de laboratoire (voir les articles AgroReporter « Les PRO font leur CINEma » du 24 mai 2013 et « Méthode du Bilan Azoté - Episode 3/3 : la minéralisation nette de l'azote organique d'un produit organique » du 5 décembre 2013).
La fertilisation organique se développe également pour les cultures hors sol (horticulture, maraichage, pépinière), notamment par la demande du consommateur de réduire l'usage d'intrants de synthèse. Le maintien d'un taux de TVA intermédiaire à 10% , applicable depuis le 01/01/2014 pour les matières fertilisantes d'origine organique agricole, n'ira pas à l'encontre de cette évolution. Mais les références acquises en pleine terre peuvent-elles être transposées aux substrats ? Quels paramètres doivent être pris en compte pour optimiser l'efficacité azotée d'un engrais organique dans un substrat ? Cet article d'Agro-Reporter apporte des éléments de réponse basés sur les récentes études menées par l'Institut technique de l'horticulture (ASTREDHOR) en collaboration avec LCA et SAS Laboratoire.

## La terre, un substrat comme les autres ?

En pleine terre, la minéralisation de l'azote organique de l'engrais est réalisée par les micro-organismes du sol, libérant ainsi l'azote minéral (ammoniacal et surtout nitrique) que la plante pourra ensuite assimiler. Pour une libération d'azote minéral optimale, les conditions de milieu doivent être favorables au développement des micro-organismes : température clémente, sol ressuyé, pH neutre à légèrement basique, bon contact entre les micro-organismes et les engrais). Dans un support de culture, ces paramètres peuvent être radicalement différents des conditions optimales des micro-organismes :
- Tout d'abord, le substrat est un milieu relativement inerte, avec peu ou pas d'activité biologique. C'est d'ailleurs une propriété recherchée, car le substrat est avant tout un support, qui doit se dégrader le moins possible dans le temps.
- Ensuite, les amplitudes de variation de la température et de l'humidité au sein du substrat peuvent être très importantes, suivant le mode de conduite (gestion de l'irrigation notamment). Cela peut limiter la minéralisation de l'engrais, mais également occasionner des libérations brutales d'azote minéral lors de variations soudaines de température et d'humidité.
- La nature même du substrat peut impacter la minéralisation de l'azote. Le pH optimum pour la majorité des cultures se situe autour de 5.8 à 6, ce qui peut être limitant pour les micro-organismes nitrifiants. Au niveau physique, la granulométrie de certains substrats peut être relativement grossière, ce qui limiterait les surfaces de contact entre l'engrais organique et les micro-organismes.
Ces contraintes spécifiques aux supports de culture justifient des études appropriées, s'appuyant sur des outils analytiques pertinents.

## Adapter pour mieux quantifier

La méthode normalisée d'estimation du potentiel de minéralisation azote des amendements organiques (XP U44-163) ou des engrais organiques (XP U42-163) est basée sur une incorporation du produit broyé dans une terre de référence. Ces conditions expérimentales ne permettent pas de rendre compte des spécificités des supports de culture.
Pour répondre à la problématique des substrats, une méthode dérivée a été mise au point, notamment par LCA et SAS Laboratoire : l'engrais organique, non broyé, est incorporé dans un substrat de référence à la dose d'usage. L'évolution du stock d'azote minéral est obtenue par extraction aqueuse, et peut être comparée aux mesures faites pour les contrôles en cours de production.
Cette méthode a permis de mettre en évidence plusieurs phénomènes spécifiques aux supports de culture.
Des essais ont été menés par différentes stations de l'ASTREDHOR. Plusieurs points importants ressortent de ces essais.

## 1er enseignement : nécessité d'une bonne activité biologique

L'étude des cinétiques d'évolution de l'azote minéral révèle que l'azote ammoniacal peut être la forme dominante sur le premier mois d'incubation à 28°C (ce qui peut correspondre à 2 à 3 mois en conditions de culture, en fonction des conditions de température du milieu).

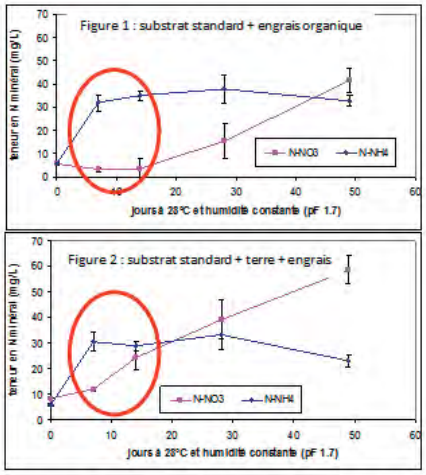


Figure 1 : substrat standard + engrais organique
Teneur en N minéral (mg/L)
jours à 28°C et humidité constante (pF 1.7)
N-NO3
N-NH4
Figure 2 : substrat standard + terre + engrais
Teneur en N minéral (mg/L)
jours à 28°C et humidité constante (pF 1.7)
N-NO3
N-NH4

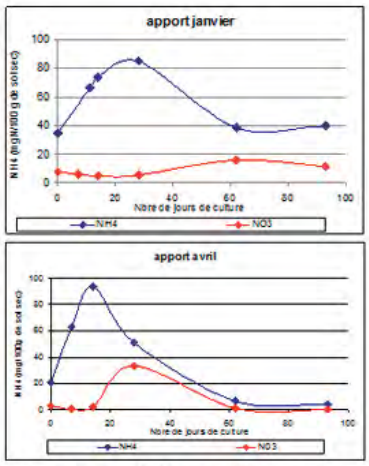
*Cinétique de libération d'azote minéral d'un mélange substrat + engrais organique (4.5 kg/m3 d'un engrais organique 5-3,5-8 + 0.5 kg/m3 de corne broyée fine 13-0-0) – Essai CDHR Centre / SAS Laboratoire*

L'ammonification (transformation de l'azote organique en azote ammoniacal) se déroule donc sans problème, mais la nitrification (transformation de l'azote ammoniacal en azote nitrique) peut être limitée, notamment dans certains terreaux. Cela peut être fortement influencé par l'humidité à laquelle se trouve le terreau, en relation avec la gestion de l'irrigation.

Ce phénomène est peu fréquent dans les sols agricoles. Dans certaines conditions expérimentales, cette potentielle inhibition de la nitrification semble levée lorsque que de la terre est ajoutée au mélange substrat / engrais (10 % en volume). La terre agricole étant naturellement pourvue en micro-organismes, il est possible que ce blocage de nitrification soit dû à une activité biologique insuffisante.

L'ajout d'un inoculum dans le substrat apparaît nécessaire pour valoriser le potentiel d'un engrais azoté organique : terre agricole à forte charge microbienne, compost, ferment, micro-organismes… Des études restent à faire pour comparer l'efficacité des différents inoculums.

## 2ème enseignement : importance du facteur climat

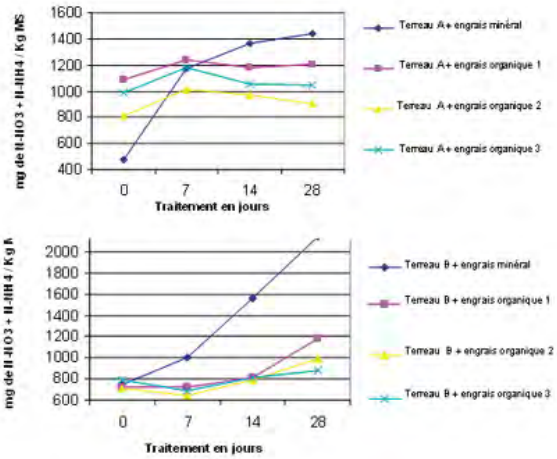



*Suivi d'azote minéral dans un mélange substrat + engrais organique (4.5 kg/m3 d'un engrais organique 5-3,5-8 + 0.5 kg/m3 de corne broyée fine 13-0-0 en conditions de culture – Essai CDHR Centre*

Le suivi en serre des teneurs en azote minéral d'un substrat fertilisé avec un engrais organique révèle des profils cohérents avec les résultats des cinétiques de minéralisation en laboratoire : dans les cas où l'azote ammoniacal est prédominant au début de la cinétique de minéralisation en laboratoire, on observe le même comportement au niveau des essais en serre, avec un décalage dans le temps dépendant des températures.
Le climat impacte très fortement la nitrification, la transformation étant beaucoup plus rapide pour un apport d'avril.
La dominance de l'azote ammoniacal en début de culture peut poser des problèmes d'intoxication ammoniacale, qui sont de plus favorisés en conditions froides. La gestion de la température de culture doit donc être prise en compte dans le raisonnement de la fertilisation organique.(...)

(...)

## 3ème enseignement : raisonner le couple engrais organique / substrat




*Quantité d'azote minéralisé sur 28 jours - Influence du couple terreau/engrais organique sur 2 terreaux et 3 engrais organiques. Essai ASTREDHOR : Gie fleurs et plantes du Sud –Ouest*

La grande diversité des supports de culture engendre également une variabilité de la minéralisation des engrais organiques. Le comportement d'un même engrais sera différent dans un substrat motte (plus fin) ou pépinière (plus grossier). La granulométrie du substrat a donc un impact non négligeable. De même, la nature des matières premières ainsi que leur proportion peut influencer le devenir des engrais organiques dans un terreau. L'efficacité d'un engrais organique ne peut donc pas se raisonner seule. Il faut tenir compte du substrat dans lequel il sera incorporé et notamment de sa capacité de rétention en eau et en air à pF1.

***Ces premiers essais ont montré la pertinence d'adapter la méthode d'incubation aux supports de culture. Les travaux doivent être poursuivis pour compléter la compréhension des phénomènes. La constitution d'une base de référence pour quelques substrats types sera une étape incontournable.***

# BONNE PIOCHE

D'une façon générale, une analyse reflète aussi la qualité du prélèvement. Ce postulat est valable quelle que soit la matrice, mais l'est encore plus pour les matières fertilisantes. En effet, ces produits faisant l'objet d'échanges commerciaux, leur échantillonnage est soumis à des contraintes réglementaires précises que présente cet Agro Reporter. Une matière fertilisante est un produit dont l'emploi est destiné à assurer ou à améliorer la nutrition des végétaux, ainsi que les propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols (définition Anses - Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail).

## De la nécessité d'un échantillonnage représentatif

Comme toutes matrices, les matières fertilisantes stockées en tas présentent une certaine hétérogénéité que la pratique d'échantillonnage aura pour but de prendre en compte. Le tableau 1 illustre un exemple d'hétérogénéité, expliquée par les fractions granulométriques dans le cas d'un compost de déchets verts.

| En g/kg MF | < 40 mm | < 20 mm | < 12,5 mm | < 8 mm | < 5 mm |
|---|---|---|---|---|---|
| MO | 429 | 402 | 373 | 352 | 335 |
| C/N | 17.2 | 16 | 14.3 | 13.4 | 12.6 |
| NtK | 12.1 | 12.7 | 13.6 | 14.2 | 19.3 |
| P2O5 | 3.4 | 3.6 | 4 | 4.1 | 5.6 |
| K2O | 11 | 11.5 | 12.2 | 12.5 | 17.1 |
| CaO | 36 | 39 | 43 | 44 | 59 |
| MgO | 4.1 | 4.4 | 4.9 | 5 | 6.9 |

*Tableau 1 : Variabilité des teneurs dans un compost de déchets verts en fonction de la fraction granulométrique analysée (répartition granulométrique en % massique : 0-2 mm : 29%, 2-8 mm : 35%, 8-12,5 mm : 9%, 12,5-25 mm : 12%, 25-40 mm : 8%, > 40 mm : 7%) (source ADEME)*
**NtK : Azote total Kjeldahl : somme de l'azote ammoniacal et de l'azote organique*

Pour être représentatif, l'échantillonnage doit se faire de telle sorte que chaque particule ait la même chance d'être échantillonnée. Pour un andain de compost par exemple, il faut s'assurer que l'outil de prélèvement puisse atteindre toutes les parties du tas. Ainsi lorsque l'andain est trop grand, il faudra l'ouvrir à l'aide d'un outil mécanique. La répartition des prises élémentaires doit également être aléatoire.

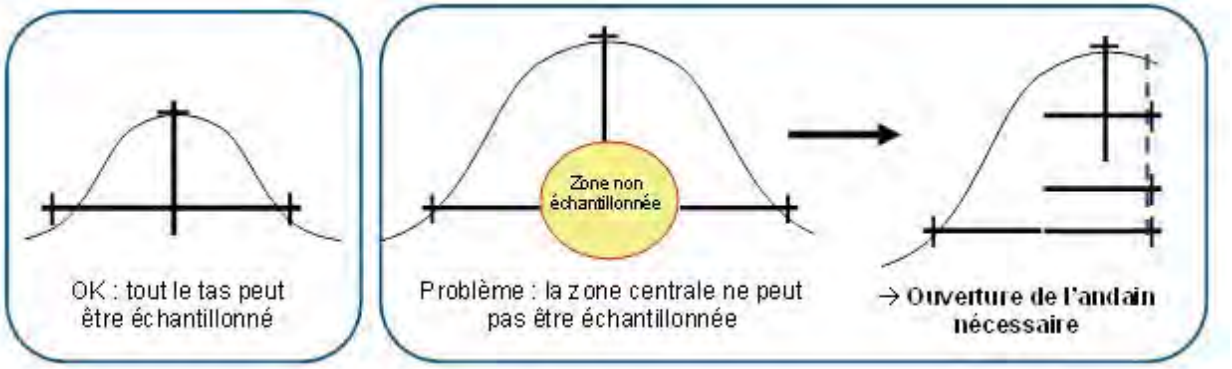
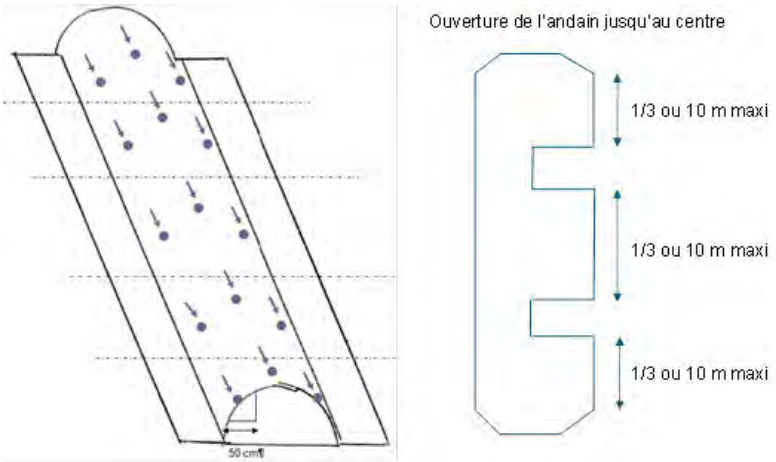

OK : tout le tas peut être échantillonné
Zone non échantillonnée
Problème : la zone centrale ne peut pas être échantillonnée
→ Ouverture de l'andain nécessaire

*Figure 1 : modalités d'échantillonnage d'un andain*




## Echantillonnage et réglementation

Les matières fertilisantes sont des produits commercialisés et doivent donc garantir une constance de composition par rapport aux teneurs déclarées. Les analyses ont un poids réglementaire dans ce contexte, et l'échantillonnage en est le premier maillon.

Plusieurs textes font référence dans ce domaine. Il y a tout d'abord la norme NF EN 12579(1) qui concerne les amendements organiques et les supports de culture. Cette norme n'a pas un statut réglementaire au niveau français, mais fait consensus au niveau des producteurs de matières fertilisantes. Elle est d'ailleurs citée dans le guide d'application de la norme NF U44-051(2). Cette norme encadre la pratique du prélèvement pour des produits en vrac et emballés :

- Un lot de plus de 5000 m3 (ou 10 000 emballages) ne peut pas être échantillonné de manière représentative
- Le nombre de points d'échantillonnage (N) se définit comme suit : N = 0,5 x √(volume du lot en m3 ou nombre d'emballages), avec un minimum de 12 et un maximum de 30 (voir tableau 2)
- Le prélèvement sur un produit en vrac doit se faire sur toute l'épaisseur du matériau, en prenant soin d'enlever les 50 premiers cm (la couche de surface ne doit donc pas être échantillonnée)

(...)

| Dimension du lot en volume | Dimension du lot en poids (estimation pour une densité de 0.6) | Nombre de prélèvements élémentaires |
|---|---|---|
| < 580 $m^3$ | < 350 tonnes | 12 |
| 1000 $m^3$ | 600 tonnes | 16 |
| 1500 $m^3$ | 900 tonnes | 19 |
| 2000 $m^3$ | 1200 tonnes | 22 |
| 2500 $m^3$ | 1500 tonnes | 25 |
| 3000 $m^3$ | 1800 tonnes | 27 |
| > 3500 $m^3$ | > 2100 tonnes | 30 |

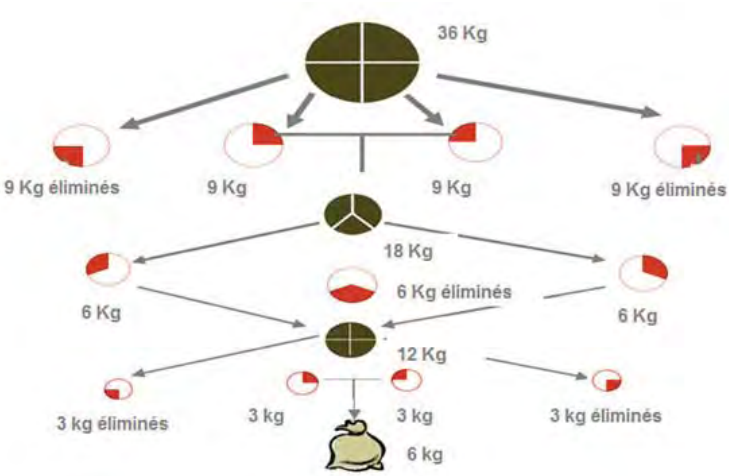
*Tableau 2 : Nombre de prises élémentaires selon la dimension du lot comme défini dans la NF EN 12579*

Pour les engrais minéraux et les amendements minéraux basiques, il faut se référer à la norme NF EN 1482-1 . Elle décrit notamment le prélèvement sur des produits en mouvement. Il n'existe pas de norme d'échantillonnage des engrais minéraux en tas statiques, mais des travaux sont en cours à ce sujet au niveau européen (CEN/TC 260, nous contacter pour plus d'informations).

Le texte réglementaire décrivant la procédure d'échantillonnage est l'arrêté du 8 décembre 1982 , qui définit les modalités techniques du contrôle officiel des matières fertilisantes et supports de culture et les vérifications auxquelles le responsable de la mise sur le marché doit procéder. La répression des fraudes se réfère à ce texte lorsqu'elle effectue ces contrôles. Ce texte indique notamment le nombre de prises élémentaires à réaliser pour constituer l'échantillon à envoyer au laboratoire. Pour un lot de moins de 2,5 tonnes, il faut réaliser 7 prises élémentaires. Au-delà de 2,5 tonnes, le nombre de prises élémentaires (N) se calcule comme suit :
N = √(20 x masse du lot en tonnes),
avec un maximum de 40 prises élémentaires au-delà de 80 tonnes
Cet arrêté diffère de la norme NF EN 12579, notamment au niveau du nombre de prises élémentaires, qui est bien plus élevé dans l'arrêté du 8 décembre 1982. De plus, l'arrêté ne demande pas d'enlever les 50 premiers cm et ne précise pas les modalités de prélèvement.

## Quartage et conditionnement pour envoi au laboratoire

En respectant le nombre de prises élémentaires demandées dans les différents textes, la quantité de matière récupérée est souvent bien supérieure à ce dont le laboratoire a besoin pour réaliser les analyses. Il est alors nécessaire de sous échantillonner, selon la méthode du quartage : les prises élémentaires sont regroupées, mélangées puis divisées en 4 parties. Deux quarts opposés sont éliminés, les 2 quarts restant sont mélangés de nouveau. Ce processus est répété jusqu'à obtenir la quantité de matière appropriée, le plus souvent entre 2 et 12 L selon les analyses demandées.




*< - Figure 2 : Processus de quartage (source ADEME)*

Une fois le quartage réalisé, les échantillons doivent être conditionnés pour envoi au laboratoire. En fonction des analyses demandées, les contenants ne seront pas les mêmes :

- Pour les composés traces organiques : contenant en verre (le plastique risquerait de contaminer l'échantillon)
- Pour les analyses microbiologiques : contenant stérile

Le laboratoire fournit généralement les contenants appropriés, tels que ceux présentés en Figure 3.

*Figure 3: Exemples de conditionnement (source LCA)*

Sachets PEHD 1 et 4 litres
Bocal verre blanc 850 ml
Flacon PEHD aseptique 1000 ml
Glacière anti-chocs
Valeur agronomique, éléments traces métalliques, tests biologiques, granulométrie
Micropolluants organiques (HAP, PCB, autres)
Microbiologie
Microbiologie, analyse des eaux

Pour limiter au maximum les contaminations au moment du prélèvement, les outils utilisés doivent être propres et en bon état. Par exemple, un outil de prélèvement rouillé ou écaillé peut contaminer l'échantillon en chrome et nickel (composants de l'acier inoxydable). Pour les analyses microbiologiques, il est recommandé de désinfecter l'outil à l'alcool entre chaque échantillon.

Quelle que soit l'analyse demandée, l'envoi au laboratoire doit se faire dans les plus brefs délais. Les matières fertilisantes, étant des produits « stabilisés », évoluent peu lors du transport si celui est rapide. L'acheminement en contenant réfrigéré n'est donc pas indispensable, sauf pour les analyses microbiologiques, mais il constitue une sécurité supplémentaire.

*(1) NF EN 12579 (Décembre 2013) Amendements organiques et supports de culture – Échantillonnage*
*(2) GA U44-191 (Juin 2011) Amendements organiques - Guide d'interprétation de la norme NF U 44-051:2006 "Amendements organiques - Dénominations, spécifications et marquage" et de son amendement A1:2010*
*(3) NF EN 1482-1 (Avril 2007) Engrais et amendements minéraux basiques - Échantillonnage et préparation de l'échantillon - Partie 1 : échantillonnage*
*(4) Arrêté du 8 décembre 1982 portant sur les modalités techniques du contrôle officiel des matières fertilisantes et supports de culture et vérifications auxquelles le responsable de la mise sur le marché doit procéder*

# METHANISATION

EDITION COMPLETE

# LCA, PARTENAIRE IMPLIQUÉ DANS LA MÉTHANISATION

*Publié le 22 juin 2012*

Depuis 2008, le LCA s'investit dans les analyses en lien direct avec la méthanisation et la valorisation du digestat. Référent depuis de nombreuses années sur la thématique des produits organiques et de leur devenir, il répond ainsi aux besoins des gestionnaires d'installations de méthanisation en proposant une gamme d'analyses et d'expertises adaptées à leurs attentes. Dans cette filière actuellement en plein essor, mais souvent en quête de références, il n'était pas simple d'identifier les prestations attendues par les gestionnaires, et les écueils techniques à résoudre pour le laboratoire… . De nombreux échanges avec les constructeurs, gestionnaires d'installations, instituts de recherche, bureaux d'études et institutionnels ont abouti à définir une offre analytique adaptée aux problématiques spécifiques de cette filière. La mise en œuvre de celle-ci s'est concrétisée, début 2012, par des investissements en matériel de laboratoire (lyophilisateur, congélateur de grande capacité), et un partenariat avec l'ITE de Narbonne. Cet article présente un premier tour d'horizon de cette nouvelle gamme d'analyses proposées par LCA. Il sera suivi prochainement d'autres sujets traitant du même thème.

## NATURELLEMENT COMPLEXE

Encouragée par les politiques publiques, la méthanisation présente un double intérêt : permettre une dégradation rapide de la matière organique de déchets fermentescibles, tout en assurant une production conséquente d'une énergie renouvelable valorisable sous différentes formes, le biogaz. En France, cette technologie est largement répandue dans le secteur industriel, pour le traitement des effluents, depuis près de 30 ans. La valorisation des déchets fermentescibles par méthanisation est plus récente. En plein développement et nécessitant des installations de type industriel, cette pratique exige un pilotage fin dans lequel l'analyse est souvent l'une des clés de la réussite. Pourtant la méthanisation, ou digestion anaérobie, est un processus naturel ! Mais il met en œuvre un écosystème microbien complexe, et donc sensible. Or la performance du digesteur dépend de la stabilité de cet écosystème. L'intérêt énergétique, l'équilibre trophique et la régularité de composition du mélange entrant sont donc de mise. L'utilisation de matières entrantes hétérogènes et de composition variable va a priori à l'encontre de ce principe. Le seul moyen de s'en affranchir est de bien caractériser au préalable la qualité des déchets entrant dans l'unité de méthanisation. L'analyse fréquente des matières entrantes et le suivi analytique de la digestion prennent alors tout leur sens..

## DES ANALYSES OUI, MAIS PAS N'IMPORTE COMMENT !

L'analyse chimique des matières entrantes les plus intéressantes pour la filière méthanisation pose des problèmes importants pour un laboratoire classique d'analyse de déchets organiques, notamment dans le cas de matières riches en corps gras et en sucres :

> ils ne peuvent pas être déshydratés en étuve à 105 °C comme des boues ou des composts. Très concrètement, de nombreux produits gras se transforment en huile après leur passage à l'étuve puis restent à l'état liquide et ne se déshydratent pas. De leur côté, les produits sucrés se transforment en caramel au broyage…

> leur teneur élevée en carbone limite les performances de la minéralisation à l'eau régale, étape indispensable avant le dosage des éléments majeurs (P, K, Ca, Mg, S, Na) et des métaux.

> la relation entre la teneur en carbone et la perte au feu de la matière sèche n'a rien à voir avec celle observée sur les autres produits organiques (composts, boues) ; le carbone organique doit donc être impérativement mesuré et non pas estimé à partir d'un rapport statistique.

> le dosage de l'azote Kjeldahl doit être réalisé sur le produit frais mais ces déchets présentent souvent une forte hétérogénéité de composition. Le résultat de cette analyse peut donc poser des problèmes de variabilité et de représentativité.

La méthode Dumas par combustion sèche, réalisée sur produit déshydraté et broyé, lui est préférée.

> le dosage des sucres totaux doit se faire selon la méthode à l'Anthrone, permettant un dosage des oses, diosides, polysaccharides (dont l'amidon et les dextrines), glucose, fructose, saccharose, … et ne pas se limiter au dosage des sucres réducteurs.

> le dosage des protéines doit utiliser une méthode telle que Lowry, permettant de quantifier les liaisons peptidiques. Une estimation par calcul à partir de la teneur en azote total n'est pas suffisante.

L'utilisation de méthodes adaptées et la prise en compte par le laboratoire des particularités des matières entrantes de digesteurs, notamment lorsqu'il s'agit de déchets gras ou sucrés ou très hétérogènes, sont des prérequis pour obtenir de résultats d'analyses réellement utilisables par l'exploitant.

Pour s'affranchir en partie des contraintes de ces produits organiques bien particuliers, il est nécessaire de procéder à un traitement préliminaire des échantillons par lyophilisation suivie d'un broyage. Cette technique, qui consiste à surgeler l'échantillon puis à le réchauffer rapidement sous vide, induit une sublimation de l'eau contenue dans l'échantillon. Cette préparation est la plus efficace pour déshydrater et homogénéiser les déchets quelque soient leur composition. Il est donc fondamental que le laboratoire qui procède aux analyses soit en mesure de réaliser cette préparation.

## GAMME ANALYTIQUE COMPLÈTE DÉDIÉE À LA MÉTHANISATION

En plus des moyens de lyophilisation mis en place au sein du laboratoire LCA, une adaptation de notre méthode de minéralisation des produits organiques a été développée afin d'obtenir une bonne qualité d'extraction sur ces matrices complexes. Au LCA, les échantillons « méthanisation » sont inscrits dans un circuit analytique dédié. Ils sont clairement identifiés et font l'objet d'un traitement spécifique. Les résultats sont édités sur un rapport d'analyse lui aussi spécifique, dont une version « pdf » est immédiatement mise en ligne et consultable par le demandeur.

In fine, LCA propose désormais à ses clients exploitant une unité de méthanisation une gamme complète de prestations s'articulant autour de trois catégories :

- Caractérisation des matières entrantes
- Suivi des digesteurs (analyses des inhibiteurs et des nutriments)
- Caractérisation des digestats (aptitude à l'épandage et au compostage)

Agréé par le Ministère chargé de l'environnement, LCA peut également assurer d'autres prestations qui découlent de l'activité de méthanisation :

- Conformité à la réglementation ICPE (analyses de rejets, des eaux pluviales, des eaux souterraines)
- Analyses de sols dans le cadre de plans d'épandages

***> Une documentation complète est disponible auprès de notre service communication***

# ÉVOLUTION DE LA RÉGLEMENTATION ICPE

*Publié le 27 janvier 2011*

La filière de la méthanisation, notamment dans le secteur agricole, est en pleine expansion en France. Comme toutes les activités susceptibles de causer des nuisances à l'environnement, ces installations sont soumises à la réglementation ICPE : Installation Classée pour la Protection de l'Environnement.

## UN NOUVEAU DÉCRET

Jusqu'en 2009, les installations de méthanisation relevaient de plusieurs rubriques, 2170/167c/322B3/2730, en fonction de l'origine des déchets traités.
Un décret du 29 octobre 2009 (n°2009-1341) a permis de simplifier et de clarifier la réglementation applicable à ces installations. En effet une nouvelle rubrique, 2781, spécifique aux installations de méthanisation de déchets non dangereux ou de matière brute, est désormais mentionnée. Toutefois, il est important de préciser que les installations de méthanisation d'eaux usées et de boues d'épuration urbaines, lorsqu'elles sont méthanisées sur leur site de production, ne relèvent pas de cette rubrique.

Cette nouvelle nomenclature définit les régimes réglementaires applicables, en fonction de l'origine et de la quantité des effluents traités :
Extrait du décret du 29 octobre 2009 (n°2009-1341).

| n°rubrique | Désignation de la rubrique | A,D,S,C(1) | Rayon (2) |
|---|---|---|---|
| 2781 | Installations de méthanisation de déchets non dangereux ou matière végétale brute à l'exclusion des installations de stations d'épuration urbaines<br>1. Méthanisation de matière végétales brute, effluents d'élevage, matières stercoraires, déchets végétaux d'industries agroalimentaires :<br>a) la quantité de matières traitées étant supérieure ou égale à 30t/j | A | 2 |
| | b) la quantité de matières traitées étant inférieure à 30t/j | DC | |
| | 2. Méthanisation d'autres déchets non dangereux | A | 2 |

(1) A : autorisation, D : déclaration, S : servitude d'utilité publique, C : soumis au contrôle périodique prévu par l'article L 512-11 du code de l'environnement.
(2) Rayon d'affichage en kilomètres.

Les prescriptions techniques relatives à l'exploitation de ces installations ont été définies selon les régimes dans les arrêtés ministériels :
· du 10 novembre 2009 pour les installations soumises à déclaration
· du 12 août 2010 pour les installations soumises à enregistrement
· du 10 novembre 2009 pour les installations soumises à autorisation

## DEVENIR DES DIGESTATS

La valorisation des déchets issus de la méthanisation (digestats) est également réglementée. Le digestat, épandu en l'état, conserve un statut de déchet. Il est donc soumis à un plan d'épandage, avec caractérisation du produit à épandre, du sol récepteur et de la quantité épandue. Les valeurs seuils réglementaires (arrêté préfectoraux, règlement sanitaire départemental, …) doivent être respectées. La responsabilité du producteur de déchet reste engagée sur les incidences éventuelles de l'épandage.
La reconnaissance d'un statut de produit permet de réduire les contraintes d'utilisation de ces matières. Elle suppose de satisfaire les critères d'efficacité et d'innocuité des amendements organiques. A l'heure actuelle un traitement ultérieur du digestat (de type compostage) est requis. Ceci pourrait être amené à évoluer. Les professionnels de la filière travaillent à un projet de normalisation des digestats dans le cadre de l'Afnor (Association Française de Normalisation).

**Cette évolution relativement récente du contexte réglementaire devrait structurer le développement de la filière.**

# LES LABOS COINCENT LA BULLE

*Publication du 16 mai 2013*

Les filières de traitement des résidus organiques intégrant une transformation par méthanisation, connaissent aujourd'hui un essor important, particulièrement en France. La caractérisation des substrats impliqués, et notamment la détermination de leurs potentiels méthanogènes, constitue une étape centrale et incontournable pour toute réflexion autour des procédés de méthanisation. Ils sont à prendre en compte depuis l'analyse technique et économique d'un projet, le dimensionnement des installations de traitement et de valorisation, jusqu'à l'évaluation et l'optimisation des performances des procédés. C'est également un indicateur indispensable pour l'estimation de la stabilité des massifs de déchets stockés dans les ISDNDs(1) . Cet article de l'AgroReporter fait le point sur les connaissances actuelles relatives au potentiel méthanogène : à quoi correspond-il ? Comment le mesure-t-on ? Comment interpréter et utiliser les résultats ?

## DÉFINITIONS ET THÉORIE

Le potentiel méthanogène, ou BMP (Biological Methane Potential), représente la quantité de méthane (CH4) produite lors de la dégradation de la matière organique. Il est exprimé en Nm3 de CH4, par kg de matière volatile, par kg de matière sèche et par kg de matière fraîche pour un produit « solide » ou en en Nm3 de CH4 par kg de demande chimique en oxygène (DCO) et par litre, pour un effluent liquide.

La valeur théorique du potentiel méthanogène peut être déduite de la composition élémentaire (CHONS) d'une matière donnée, à partir de l'équation de Buswell (2) :

$$C_nH_aO_bN_cS_d + \left(n - \frac{a}{4} - \frac{b}{2} + 3\frac{c}{4} + \frac{d}{2}\right)H_2O \rightarrow \left(\frac{n}{2} - \frac{a}{8} + \frac{b}{4} + 3\frac{c}{8} + \frac{d}{4}\right)CO_2 + \left(\frac{n}{2} + \frac{a}{8} - \frac{b}{4} - 3\frac{c}{8} - \frac{d}{4}\right)CH_4 + cNH_3 + dH_2S$$

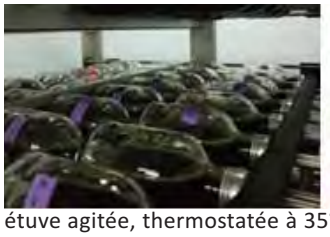
Ainsi, par exemple, pour le glucose de formule C6H12O6, on obtient 3CO2 + 3CH4, donc 0,373 ℓ de CH4/g de glucose. Pour une protéine de formule C5H7NO2 on obtient de même 0,496 et pour des lipides de formule C57H104O6 on obtient 1,0 ℓ de CH4/g.

Cependant, la matière organique des déchets est plus complexe qu'un substrat simple. Non seulement elle contient des glucides, protéines et lipides très variés mais elle contient également d'autres molécules organiques dont certaines ne sont pas biodégradables. De plus, certains mécanismes physiques liés notamment à la taille des particules peuvent empêcher une partie de la matière organique d'être dégradée. Du fait du temps de dégradation élevé de certains composants et de temps de séjour courts des déchets dans le méthaniseur, le potentiel calculé par la formule de Buswell est plus élevé que ce qui est observé au niveau industriel. Ainsi la connaissance de la formule brute de la matière organique ne permet pas de savoir si elle est effectivement biodégradable. La mesure du potentiel méthanogène, qui est une mesure directe de la capacité d'un déchet à produire du méthane, présente donc un intérêt certain pour évaluer sa biodégradabilité.

## PRINCIPE DE LA MESURE DE RÉFÉRENCE

La mesure du potentiel méthanogène a fait l'objet de différents protocoles, dont on peut trouver une excellente synthèse dans un article d'Angelidaki et Sanders (2004)(3) . D'une façon générale, ces protocoles visent à produire les conditions optimales de la méthanisation de la matière organique du déchet afin d'exprimer la totalité, ou le maximum, de son potentiel méthanogène. Les méthodes restent à standardiser afin de pouvoir mieux comparer les résultats entre eux

La mesure de ce potentiel selon la méthode de référence développée ici, peut être réalisée pour tout type de biomasse : effluents d'élevages (lisiers, fientes, fumiers…), déchets agroalimentaires (résidus lignocellulosiques, graisses, boues …), déchets de collectivités (biodéchets, boues de STEP…), cultures énergétiques (plante entière, ensilage, paille…) ainsi que tout autre résidu ou produit organique solide ou liquide.



Ce test de fermentation consiste à placer une quantité connue de l'échantillon en présence d'un inoculum microbien adapté et actif en condition anaérobie. La mesure du potentiel méthanogène est réalisée dans des fioles de 500 ml, placées dans une étuve agitée, thermostatée à 35°C. L'échantillon est préalablement caractérisé selon les paramètres suivants : matière sèche et matière volatile pour un échantillon solide, demande chimique en oxygène (DCO) pour un échantillon liquide. Une fiole ne contenant que l'inoculum, sert de témoin pour chaque essai. Ce témoin permet de mesurer l'activité endogène de cet inoculum (boues anaérobies) qui sera déduite pour le calcul du potentiel méthanogène.

Une quantité connue de l'échantillon caractérisé est ajoutée dans les fioles. Les microorganismes dégradent la matière organique apportée, ce qui se traduit par la production de biogaz. A la fin de cette phase de réaction, la vitesse de production de biogaz chute, signe de la fin de la biodégradation de la matière organique. La production de biogaz est mesurée au cours du temps et la composition du biogaz produit est analysée tout au long du suivi de l'essai par chromatographie en phase gazeuse. Le potentiel méthane de chaque échantillon est déterminé à partir de la quantité cumulée de méthane produit dans chaque fiole.

## PRÉDIRE LE POTENTIEL MÉTHANOGÈNE EN QUELQUES JOURS : LA MESURE FLASH BMP©

La mesure Flash BMP© est l'analyse du potentiel méthane des déchets par spectroscopie proche infrarouge (SPIR) en seulement 2 jours. L'analyse repose sur une mesure globale par SPIR de la matière organique d'un échantillon. La SPIR analyse qualitativement la matière organique en distinguant les différentes familles de molécules (glucides, protéines, lipides, fibres, etc…), mais également quantitativement.

La SPIR est une méthode par apprentissage : un ensemble d'échantillons d'étalonnage est créé et utilisé afin d'établir le modèle entre les spectres des échantillons (ici les déchets) et une valeur d'intérêt (le BMP). Le modèle ainsi créé est ensuite testé à l'aide d'un jeu de validation, différent de l'ensemble d'étalonnage.

Le modèle a été établi avec l'analyse de 500 échantillons de natures différentes (Figure 1), ce qui le rend robuste vis-à-vis des différentes matrices de déchets rencontrées. Cette technique de mesure est le fruit de la collaboration entre le Laboratoire de Biotechnologie de l'Environnement de Narbonne (INRA-LBE) et de professionnels de la filière.

[…]

[...]

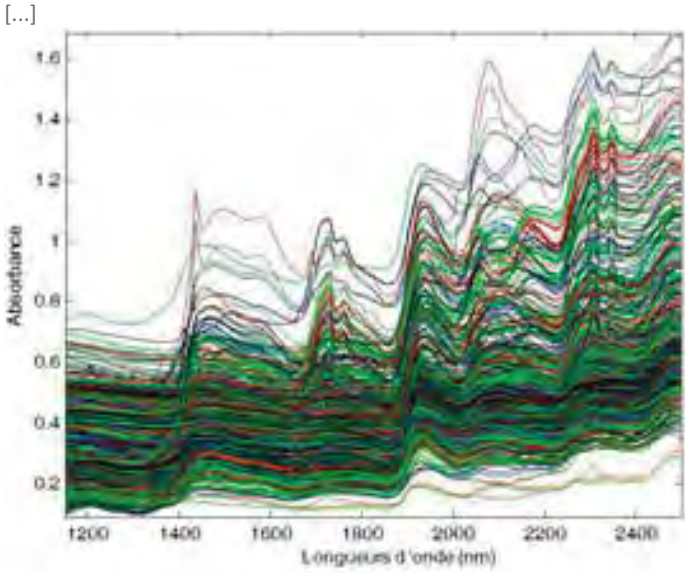



*Figure 1. Ensemble des spectres proche infrarouge utilisés dans le modèle Flash BMP©*

Une fois le spectre proche infrarouge acquis, le modèle calcule instantanément la valeur de potentiel méthane de l'échantillon analysé. Les avantages de la méthode Flash BMP© sont nombreux :

- Mesure rapide : seulement 2 jours pour la préparation de l'échantillon (séchage / broyage) et 1 minute pour l'analyse spectrale, contre plus de 30 jours pour la méthode de référence ;
- Une grande quantité de l'échantillon est analysée, comparativement à la méthode de référence, ce qui répond aux problématiques d'hétérogénéité des matrices de déchets ;
- La validation a été faite sur une grande base de données d'échantillons divers, ce qui rend le Flash BMP© robuste vis-à-vis des différentes matrices de déchets.

Les performances de Flash BMP® sont présentées dans le Tableau 1.

*Tableau 1. Performances du Flash BMP*

| *Gamme [ml CH4.g-1 MV]* | *$R^2$* | *SEP* [ml CH4.g-1 MV]* |
|---|---|---|
| 20 - 700 | 0.7 – 0.8 | 40 – 60<br>Similaire au BMP de référence |

**Erreur standard de Prédiction*

## RÉSULTATS ET INTERPRÉTATION

Les tests BMP permettent de mesurer le potentiel maximal de production de méthane du produit considéré. Ils se déroulent dans des conditions idéales, qui ne sont pas toujours représentatives de la réalité industrielle. La mesure du potentiel méthanogène renseigne donc uniquement sur la quantité maximale de méthane produite par un échantillon de matière organique. Les résultats peuvent être utilisés pour :

- valider la faisabilité économique d'un projet d'installation de méthanisation,
- contrôler ou optimiser le fonctionnement d'un digesteur.

## VERS UNE NORME POUR LA MESURE DU POTENTIEL MÉTHANOGÈNE…

L'INRA et l'INSA coordonnent actuellement une étude inter laboratoires financée par l'ADEME. Cette étude doit déboucher sur des conclusions claires quant aux méthodologies actuellement mises en œuvre et sur des propositions d'harmonisation des protocoles. L'objectif final est d'aboutir à la publication d'un protocole standardisé qui devra servir de référence pour la normalisation de la mesure du potentiel méthanogène.

Les tests BMP nous renseignent donc sur le potentiel maximal de production de méthane du produit testé dans des conditions idéales, qui ne sont pas représentatives de la réalité industrielle. La vitesse de dégradation du substrat, le volume, la composition et la cinétique de production de biogaz mesurés au cours d'un essai BMP, ne constituent en aucun cas des données reproductibles ou directement exploitables. Pour obtenir ces informations, nécessaires au dimensionnement d'une unité industrielle de méthanisation (toxicité, inhibition, carence, qualité du biogaz, cinétique et taux de biodégradation, charge appliquée, nature et composition du digestat, consommation de soude et d'additifs,…), il est donc nécessaire de réaliser un essai en bioréacteur pilote.

*Merci à Romain Cresson, de l'ITE de Narbonne, pour sa collaboration à cet article.*

# DIGÉRER C'EST PRÉVOIR

*Publié le 10 avril 2014*

Certes la méthanisation est un procédé naturel de dégradation de la matière organique en milieu anaérobie, par digestion sous l'action de plusieurs types de microorganismes. Mais naturel ne signifie pas que tout contrôle est superflu ! Ce procédé fait intervenir une suite de réactions biologiques nécessitant une coopération entre différentes bactéries. Parfois des évènements viennent perturber le processus et ne permettent plus à l'activité bactérienne de se développer correctement. L'intoxication aux acides gras volatils (AGV), ou acidose, est l'un d'eux. Elle se traduit par une acidification (pH < 7) et par une accumulation des acides organiques, d'hydrogène et de CO2 dans le milieu réactionnel. L'accumulation d'AGV dans un digesteur traduit un dysfonctionnement de celui-ci, qui peut conduire à une dégradation de la qualité du biogaz et de sa production, voire à l'arrêt du réacteur. Cet article de l'AgroReporter s'intéresse aux AGV et aux informations que ces acides organiques peuvent apporter sur la santé d'un digesteur.

## Acides, gras et volatils

Les AGV sont des acides gras à chaîne carbonée courte (moins de six atomes de carbone). Les quatre premiers acides gras sont dits volatils : acide acétique (CH3-COOH), acide propionique (CH3-CH2-COOH), acide butyrique (CH3-CH2-CH2-COOH), acide valérianique (CH3-CH2-CH2-CH2-CH2-COOH). Dans le rumen des ruminants, les trois premiers représentent respectivement 60 %, 20 % et 15 % des acides gras volatils ingérés pour une alimentation classique à base de fourrages, mais les proportions varient fortement suivant la ration. Ils sont produits par la flore microbienne de la panse des ruminants et de façon générale dans les premières étapes de la dégradation anaérobie de la matière organique, notamment dans les digesteurs industriels où ils sont considérés comme les intermédiaires les plus importants de la digestion anaérobie. Ils sont produits lors de l'acidogénèse, l'une des phases de la méthanogénèse, pour être convertis directement ou indirectement en méthane.

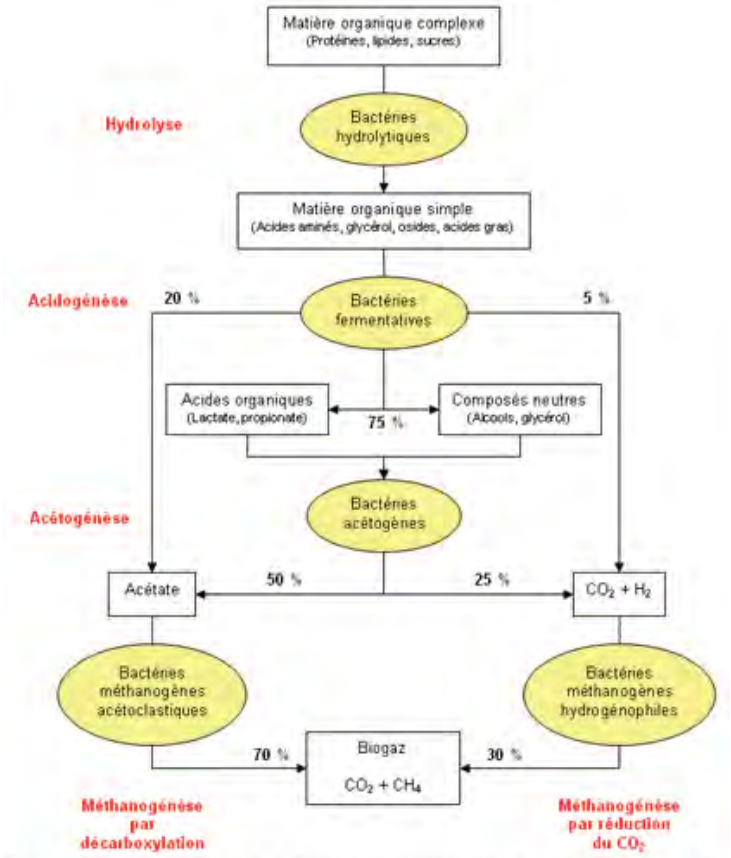



*Figure 1 : les différentes étapes de la digestion anaérobie et les flux de carbones associés (en % de DCO). Source : LBE*

## La méthanogénèse fabrique des AGV

Les AGV sont des intermédiaires réactionnels produits lors de la conversion de la matière organique en méthane. Ils sont le résultat de l'activité de populations bactériennes hydrolytiques et fermentatives, appartenant principalement aux genres Clostridium, Bacillus, Ruminococcus, Enterobacteroïdes, Propionibacterium et Butivibrio. L'apparition des AGV se situe lors d'une phase appelée acidogénèse.

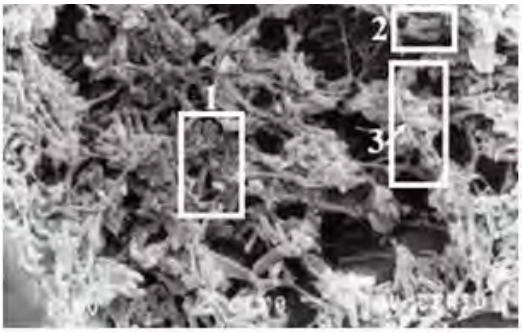
Une fois produits, ces AGV servent de substrat à une autre population de bactéries, appelées acétogènes car elles consomment les AGV les plus longs (propionate et butyrate essentiellement) et les transforment en acétate. Les bactéries acétogènes appartiennent à trois groupes : les homoacétogènes (dont des Clostridium, Acetobacterium, Sporomusa, Acetogenium, Acetoanaerobicum, Pelobacter Butyribacterium, Eubacterium), les syntrophes (Syntrophobacter, Syntrophomonas, Syntrophus) et les sulfato-réducteurs (Desulfovibrio, Desulfobacter, Desulfotomaculum, Desulfomonas).

L'acétate est enfin utilisé à son tour par un troisième groupe de bactéries : les méthanogènes, du groupe des Archae, strictement anaérobies.

La Figure 1 présente la succession de ces voies métaboliques, selon le modèle aujourd'hui le plus répandu.

Lorsque le fonctionnement des réacteurs est optimisé, l'activité de ces populations est équilibrée et les AGV produits pendant l'acidogénèse sont consommés par les bactéries acétogènes.

***Il est donc normal d'avoir des AGV dans le milieu réactionnel, mais toute accumulation va traduire un déséquilibre des voies métaboliques, une sorte d'indigestion, lors de laquelle les bactéries acétogènes n'arrivent plus à utiliser les AGV produits lors de l'acidogénèse.***




*Flore acétogène vue au microscope électronique à balayage. (1) Short and long rod-shaped bacteria (2) diplococcus in chains (probably Streptococcus-like bacteria) (3) filamentous bacilli. Source : Mussati et al. (2005)*

## Une question d'équilibre

Les réacteurs mettent en œuvre différentes populations microbiennes, associées et interdépendantes, qui forment un écosystème fragile. Au début de la chaine alimentaire de cette biologie se trouvent les substrats organiques qui vont entrer dans le digesteur. A l'image des éleveurs, les exploitants d'installation de méthanisation utilisent le terme de « ration » pour ces matières destinées à être digérées dans les réacteurs.

Lorsqu'un digesteur est stabilisé et a atteint son régime nominal, l'activité des populations bactériennes est équilibrée : les AGV produits pendant la phase d'acidogénèse sont consommés par les bactéries acétogènes et méthanogènes.

(...)

(...)
L'accumulation d'AGV dans le milieu réactionnel peut donc avoir deux grandes causes :

- Une augmentation brutale de la production d'AGV par la voie de l'acidogénèse, que les bactéries acétogènes et méthanogènes ne parviennent pas à digérer : acidogénèse > acétogénèse
- Un ralentissement de la dégradation des AGV par les bactéries acétogènes et méthanogènes, qui induit une accumulation du substrat de ces bactéries : acétogénèse < acidogénèse

Dans le premier cas, l'acidose est liée à une trop grande quantité de matières fermentescibles introduites dans le digesteur. L'accumulation d'AGV peut ainsi être observée suite à l'introduction de substrats riches en glucides et/ou lipides, rapidement hydrolysables par les bactéries hydrolytiques et acidogènes, ou à un taux de charge(1) trop élevé. Les bactéries ont une certaine capacité d'adaptation mais elles s'accommodent mal des changements brusques.

Dans le second cas, l'inhibition des bactéries acétogènes peut être expliquée par la présence de substances toxiques pour ces populations. Les plus fréquentes sont :

- le sulfure d'hydrogène (H2S) issu de la dégradation des acides aminés contenant du soufre, comme la méthionine ou la cystéine, présents par exemple dans les crucifères
- certains éléments présents en trace, comme le cuivre, le zinc, le chrome ou le plomb
- les antibiotiques et désinfectants présents dans les substrats, en lien avec les médicaments administrés aux animaux, dans les produits de nettoyage des salles de traite, etc
- les fortes concentrations en sels minéraux, qui vont augmenter la conductivité du milieu
- (l'oxygène).

Le tableau 1 présente des exemples de concentrations inhibitrices pour différents éléments

| Substance | Concentration de quelques substances qui sont : Modérément inhibitrices ($mg.l^{-1}$) | Fortement inhibitrices ($mg.l^{-1}$) |
|---|---|---|
| Sodium | 3500-5500 | 8000 |
| Potassium | 2500-4500 | 12,000 |
| Calcium | 2500-4500 | 8000 |
| Magnésium | 1000-1500 | 3000 |
| N - ammoniacal | 1500-3000 | 3000 |
| Sulfure | 200 | 200 |
| Cuivre | | 0,5 soluble<br>50 -70 total |
| Chrome(VI) | | 3,0 soluble<br>200-600 total |
| Chrome (III) | | 180-420 total |
| Nickel | | 2,0 soluble<br>30 total |
| Zinc | | 1,0 soluble |

*Tableau 1 : Concentrations d'éléments pouvant être inhibitrices sur les micro-organismes de la digestion anaérobie.*
*Source : Document d'information générale de R. Moletta, 2002*

A l'inverse, quelques cas de carence à l'origine d'une inhibition de la flore méthanogène ont été référencés : carence en cobalt ou en nickel, directe ou induite par une précipitation de ces éléments avec des sulfures dissous.

## Repérer les signes annonciateurs de l'acidose

La baisse du pH (pH < 7) est un signe d'acidose évident. Elle s'accompagne de la chute de production et de qualité du biogaz. Toutefois ces indicateurs ne font que révéler le dysfonctionnement, et ne permettent pas de le repérer précocement. Le suivi des AGV (dont l'accumulation va entrainer la baisse de pH), comme la mesure du pouvoir tampon ou de la pression partielle en hydrogène, permettent de détecter plus tôt un éventuel déséquilibre. Il semble admis que tout risque d'acidose est écarté pour des concentrations en AGV totaux inférieures à 2 g/L, des valeurs inférieures à 5 g/l étant encore acceptables. Cependant, chaque digesteur a ses propres valeurs de consigne et il n'est pas possible de définir une valeur maximale stricte à partir de laquelle la concentration en AGV totaux deviendrait dangereuse.

La modification du profil des AGV est un meilleur indicateur. En effet, lorsque l'acétogénèse est inhibée, les AGV de taille supérieure à l'acétate (C2) s'accumulent, à commencer par l'acide propionique (C3). La modification de la proportion des AGV dans le milieu, en particulier l'augmentation des proportions d'acides propioniques, butyriques et valériques par rapport à l'acide acétique, doit alerter car elle est le signe d'un début d'acidose. Lorsque le rapport « acide acétique / acide propionique » est supérieur à 3, ce risque est écarté.
Les AGV totaux et les profils d'AGV peuvent être dosés au laboratoire par chromatographie en phase gazeuse ou en HPLC. La mesure indirecte des AGV totaux par capteurs est aussi possible au niveau des digesteurs, soit par titrimétrie, soit par spectrométrie infra-rouge.

## Moyens d'action

Dans le cas d'une accumulation liée à un excès de matières fermentescibles, la première réaction doit être d'arrêter l'alimentation du digesteur. Les bactéries acétogènes et méthanogènes vont consommer les AGV présents et en faire diminuer la concentration totale. Il conviendra aussi de revoir la ration pour éviter un nouveau dysfonctionnement.
Quand la cause de l'acidose est une inhibition ou une intoxication des bactéries acétogènes et méthanogènes, la solution passe par l'identification du substrat responsable afin d'en réduire la proportion dans la ration, voire l'exclure totalement. L'analyse préalable des matières entrantes est de ce fait recommandée, notamment lorsqu'il y a un changement dans leur nature ou leur origine.
Dans tous les cas, lorsque le milieu s'acidifie, l'ajout d'hydrogénocarbonate de sodium (NaHCO3), voire de chaux ou de carbonate de calcium (CaCO3), peut être envisagé de façon curative. Il permet d'augmenter le pH (avec un objectif de l'ordre de 7,8 en général) et le pouvoir tampon des digestats.

***La production d'AGV est la conséquence et non la cause de la déstabilisation des digesteurs. Le suivi de leur concentration fait partie des moyens de suivi des processus. Le laboratoire LCA (adhérent duClub Biogaz de l'ATEE) propose la détermination des profils d'AGV, mais aussi la mesure du FOS-TAC, pour suivre vos digesteurs ainsi que les analyses complètes de caractérisation des matières entrantes. N'hésitez pas à nous contacter !***

(1) Taux de charge : quantité quotidienne de matières organiques introduites dans le réacteur. Il peut être exprimé par unité de volume (kg MO/m3.j, kg DCO/m3.j ; on parle alors de charge volumique appliquée ou CVA) ou par unité de biomasse présente dans le digesteur (kg DCO/kg MVS.j ; on parle alors de charge massique appliquée ou CMA). MO : Matière Organique , DCO : Demande Chimique en Oxygène, MV : Matière Volatile

# EAU ET DECHETS

L'AGRO REPORTER

EDITION COMPLETE

# EDILABO OU LA PÊCHE AU SANDRE

*Publié le 9 décembre 2010*

EDILABO est une démarche conduite en France par le SANDRE* pour l'échange de données informatisées dans le domaine de l'eau et de l'assainissement entre le commanditaire de l'analyse et son laboratoire.

Le Sandre a défini un format d'échange de données (se reposant sur le format .xml) et assure la mise à jour de référentiels de données permettant ainsi de dématérialiser les échanges entre le commanditaire et ses prestataires (laboratoires, préleveurs) :

- génération d'une commande dématérialisée pouvant être traitée par un préleveur et/ou un laboratoire
- obtention en retour d'un fichier de résultats normalisé EDILABO.

Le fichier de résultats est directement intégrable dans tous les logiciels de gestion de station d'épuration et de plans d'épandage compatibles EDILABO, évitant ainsi la saisie fastidieuse des données analytiques, et assurant également l'intégrité des informations (références de parcelles, références d'affaires, références de station, …) fournies lors de la commande.

**Tous les laboratoires agréés par le ministère chargé de l'environnement doivent être en mesure de traiter une demande EDILABO**. C'est une exigence de l'arrêté ministériel du 29 novembre 2006 portant modalités d'agrément des laboratoires effectuant des analyses dans le domaine de l'eau et des milieux aquatiques au titre du code de l'environnement.

Si la plupart d'entre eux sont en mesure de traiter de façon manuelle une commande d'analyse **d'eau au format Sandre (EDILABO), peu nombreux sont ceux qui sont en mesure de traiter en routine des commandes d'analyses de boues, de produits organiques, d'eaux et de sols via ce format d'échange.**

Le laboratoire LCA a décidé en 2009 de faire de ce format d'échange son standard de dématérialisation des commandes et de fourniture de fichiers de résultats.

Aujourd'hui, nous traitons ces commandes en routine, qu'elles soient émises du logiciel d'un client ayant un module de commande EDILABO, ou bien issues de notre portail de commandes dématérialisées gracieusement mis à disposition de nos clients IZILAB®.

**En retour, nous pouvons restituer :**

- le fichier de résultats au format EDILABO (conforme au Sandre)
- tout autre format de fichier (txt, csv, …)
- le rapport au format pdf

**Le portail Web IZILAB® offre bien d'autres fonctionnalités comme :**

- La planification de vos commandes d'analyse par site (station, platefome, …)
- La gestion des droits d'accès pour les différents collaborateurs
- Le suivi de l'état d'avancement des commandes et des analyses
- L'édition des fiches de renseignement
- Les alertes SMS ou Email des résultats hors limites
- Gestion des historiques des commandes et des analyses
- Importation de données client

# ROB'EAUX SCOPE

*Publié le 17 février 2011*

Dans le cadre dans la surveillance des eaux usées urbaines et industrielles, l'utilisation d'un préleveur automatique doit se faire selon les recommandations du guide pour l'échantillonnage des eaux résiduaires édité par l'AFNOR (ISO 5667-10). Un fascicule de documentation (FD T90-523) portant sur la réalisation de prélèvements pour le suivi de la qualité des eaux dans l'environnement a été publié en 2008, et sa partie 2 est également consacrée aux eaux résiduaires. Ces deux référentiels constituent les cahiers des charges qu'il convient d'appliquer pour la réalisation de tout prélèvement d'eau usée.

## POURQUOI UN PRÉLEVEUR AUTOMATIQUE ?

Les différents programmes réglementaires de surveillance de la qualité des eaux usées urbaines et industrielles sont basés sur la réalisation d'analyses. S'il importe que ces analyses soient réalisées dans des laboratoires compétents (accréditations COFRAC, agréments, ...), il est essentiel que les échantillons analysés soient représentatifs des flux réellement émis. Une industrie aura différents process de production tout au long d'une journée d'activité. La qualité de ses effluents variera donc en fonction des process successifs.

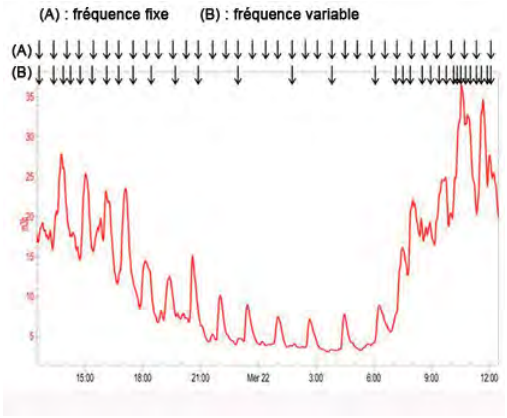
De même, une station d'épuration recevra des eaux usées dont la composition variera au cours de la journée, notamment en fonction de l'usage de l'eau qui sera fait par les habitants. Dans ces deux contextes, réaliser un prélèvement ponctuel de l'eau limite fortement la pertinence des résultats que l'on obtiendra à l'analyse.

Les préleveurs automatiques ont été conçus pour pallier cette difficulté. Ils sont capables de réaliser des prélèvements sur de longues périodes de temps (24 heures en général). Ces matériels peuvent être portables ou à poste fixe. Pour des raisons de coûts, l'installation d'un automate à « poste fixe » est souvent privilégiée par l'exploitant lorsqu'une fréquence de contrôle journalière ou hebdomadaire est exigée. Dans le cadre de fréquences moindres, il préfèrera mandater un prestataire équipé de préleveurs automatiques « portables » pour réaliser ces contrôles.

## PRÉLÈVEMENT ASSERVI AU TEMPS OU AU DÉBIT ?

Les préleveurs automatiques réalisent des prélèvements unitaires de quelques dizaines de millilitres pour constituer un échantillon global. La fréquence de prélèvement unitaire peut être fixe (70 ml toutes les 10 minutes par exemple) ou bien variable grâce à un asservissement au débit (70 ml tous les 0,5 m3 par exemple).

Un prélèvement à fréquence fixe consiste en la collecte d'une prise d'échantillon indépendamment du flux.




Le type d'asservissement - au temps ou au débit - influe sur la représentativité de l'échantillon, surtout lorsque le débit du rejet varie sur la durée totale du prélèvement. Dans ce cas de figure, le prélèvement à fréquence fixe donne un « poids » trop important à la période de faible flux par rapport à son « poids » réel dans le flux journalier. Par contre, dans le cadre du prélèvement à fréquence variable (asservissement au débit), le « poids » de la période à faible flux est représentatif du flux journalier.

## CHOIX DU MATÉRIEL

Les fournisseurs proposent des modèles et des techniques de fonctionnement différents. On retiendra principalement :

- la présence d'une enceinte isotherme ou réfrigérée (groupe froid autonome),
- un système de prélèvement par pompe péristaltique ou pompe à vide,
- la réception de l'échantillon dans un seul ou plusieurs flacons
- la possibilité de gérer la fréquence d'échantillonnage avec principalement deux modes de réglage :
  > à fréquence fixe (asservissement au temps)
  > à fréquence variable en connectant l'automate à un système de mesure de débit (asservissement au débit)

## CONTRÔLE DES AUTOMATES

Il est important de souligner que les équipements de prélèvement à poste fixe installés en entrée et/ou en sortie de station d'épuration (urbaine ou industrielle), doivent le plus souvent faire l'objet d'une vérification annuelle par un organisme extérieur reconnu compétent. Ces contrôles sont exigés notamment dans le cadre des programmes de suivi des agences de l'eau mais aussi par l'inspection des installations classées. LCA assure ces contrôles (agréé par l'Agence de l'Eau Adour Garonne).

Le service prélèvement du LCA est équipé d'un parc de 14 préleveurs automatiques dont 7 réfrigérés et 7 isothermes. Nous disposons également de 7 débitmètres et du matériel connexe nécessaire à l'asservissement de ces appareils. Ce service intervient sur le territoire national pour le compte de clients du secteur privé et du secteur public du LCA, dans le cadre de missions ponctuelles ou planifiées sur les stations d'épurations industrielles ou urbaines, sur les réseaux collectifs ou privatifs.

# LE DÉBIT DE L'EAU

*Publié le 27 février 2014*

La mesure de débit est devenue incontournable dans le domaine de l'eau et notamment de l'assainissement des eaux urbaines et industrielles. La mise en place d'un équipement de mesure de débit répond souvent à une demande de la réglementation en vigueur (arrêté préfectoral, auto-surveillance, calcul de la redevance Agence de l'Eau…) mais servira également à une meilleure connaissance du fonctionnement des ouvrages. Sur le terrain, pour des stations d'épuration recevant quelques m3 à plusieurs milliers de m3 d'eaux à traiter par jour, comme pour les réseaux de collecte des eaux usées et les réseaux de distribution d'eau de consommation, cette mesure est effectuée à l'aide de débitmètres. L'AgroReporter s'est intéressé à ces alliés précieux des exploitant du métier de l'assainissement.

## Débuts du débit

En hydraulique, le débit (Q) est le volume d'eau qui traverse une section perpendiculaire à l'axe d'un chenal ou d'un tuyau par unité de temps. Il s'agit d'une notion centrale dans une situation d'écoulement de fluide.
Quelle que soit la technique mise en œuvre, il est important de noter qu'un débitmètre ne mesure pas directement un débit. Les principales mesures associées sont en fait la hauteur, la vitesse ou la pression.
La mesure de débit se pratique en fait depuis très longtemps ! Les fontainiers et bâtisseurs d'aqueducs devaient connaître les flux d'eau pour dimensionner leurs ouvrages et les contrôler. Ainsi, sous l'ancien régime, on utilisait une jauge en métal munie de petits trous de 27 mm de diamètre. Le diamètre de ces trous correspond au pouce fontainier. Ces plaques étaient installées en avant de la prise d'eau et d'une cuvette, appelée cuvette de jaugeage. Plus tard, un récipient servant à mesurer le débit pouvait également être placé dans la cuvette.

> *La méthode du fontainier pour jauger selon l'Encyclopédie de Diderot et d'Alembert :*
> *« Le Fontainier a une boëte de fer – blanc, percée par-devant d'autant de trous d'un pouce, demi – pouce, ligne, demi – ligne qu'il veut. Il expose cette boëte à une source, tous les trous bouchés ; elle s'emplit & se répand ; alors il débouche le plus petit, puis le suivant, & ainsi de suite, jusqu'à ce que la boëte laissant échapper par les trous ouverts autant d'eau qu'elle en reçoit de la source, & demeurant par conséquent toujours pleine, les trous débouchés lui donnent la quantité d'eau qu'il cherche à connoître. »*

Au XVIIe siècle, le débit se mesure en pouce. On appelait pouce d'eau ou pouce du fontainier la quantité d'eau qui s'écoule par un orifice d'un pouce de diamètre.

Le pouce comprenait 144 lignes et correspondait à un volume de 14 pintes fourni en une minute, soit 0,8 m3/h environ (un pouce ≈ 20 m3 /jour). On ne tenait pas compte alors de la vitesse de l'écoulement.

## La mesure de débit aujourd'hui

Avec les débitmètres utilisés aujourd'hui, en fonction de l'appareil utilisé, une formule de calcul prend en compte la mesure associée instantanée (hauteur en mètre par exemple) pour la convertir simultanément en débit (généralement exprimé en m3/h). La mesure de débit dépendra également de l'ouvrage utilisé pour positionner l'appareil.
Ainsi, on peut distinguer deux types d'ouvrage :

- **La mesure de débit avec écoulement en canal ouvert :**

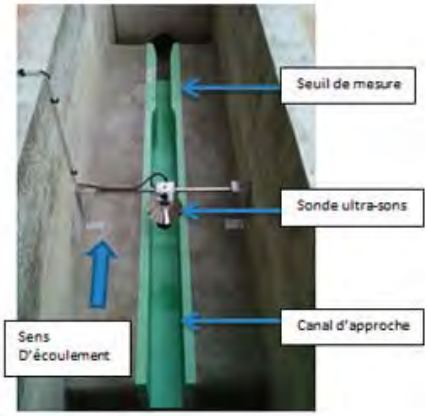



*Photo n°1*

Le principe repose sur une relation entre le débit et la cote du plan d'eau créé en amont des organes de mesures tels que des déversoirs à mince paroi, canaux jaugeurs…

Par exemple dans la configuration de la Photo n°1, la mesure de débit est effectuée par une sonde à Ultra-Sons. Cette technique consiste à mesurer une hauteur d'eau.
Le débitmètre est ici associé à un canal ouvert équipé d'un seuil jaugeur (organe de mesure). Un canal d'approche en amont du seuil jaugeur permet de tranquilliser l'écoulement des effluents.
Chaque organe de mesure est régi par une loi hydraulique normalisée (par exemple NF ISO4359 pour les canaux jaugeurs) ou d'une courbe d'étalonnage hauteur/débit fournie par le constructeur.

Le débitmètre en place est enfin programmé selon la loi hydraulique du canal de mesure utilisé.

*Photo n°2*

- **La mesure de débit avec écoulement en conduite fermée :**

L'appareil est directement intégré ou placé sur une canalisation horizontale ou verticale.
Il n'y a pas d'ouvrage de mesure spécifique à installer.

Sur les canalisations qui sont en charge (complétement remplies), l'appareil le plus couramment utilisé est le débitmètre électromagnétique (Photo n°2).

- Son principe de mesure repose selon la loi d'induction magnétique de Faraday.

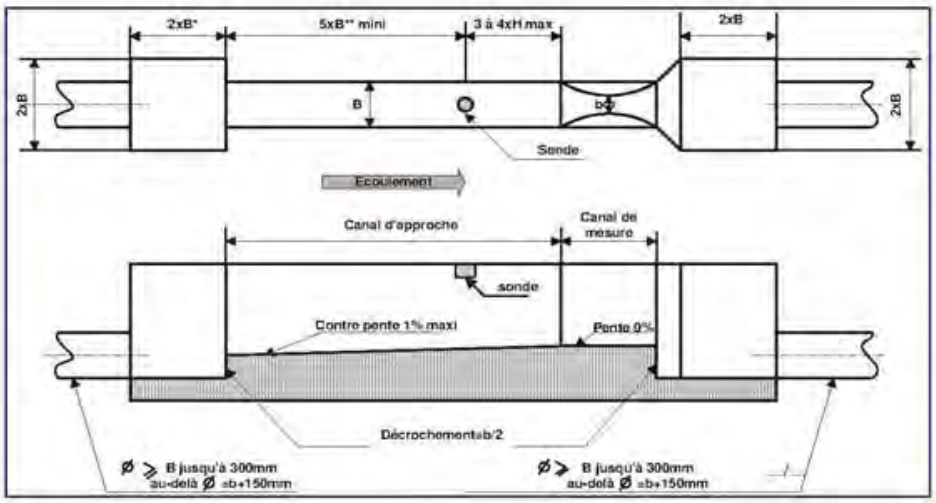
L'effluent canalisé traverse perpendiculairement un champ magnétique.

La tension induite générée est alors proportionnelle à la vitesse de l'écoulement du fluide.
La vitesse est ensuite convertie en une mesure de débit. (...)

(...)

## Les conditions de pose d'un débitmètre

Avant d'envisager la mise en place ou le renouvellement d'un appareil, il est important de s'assurer que la technologie du débitmètre envisagée est bien adaptée à la configuration du site ainsi qu'à la nature et aux caractéristiques des effluents.
L'environnement proche de l'appareil, que ce soit un canal ouvert ou une canalisation en support, doit répondre à des critères bien précis pour que le fonctionnement du débitmètre soit optimal.
Ces critères sont mentionnés dans les normes ISO/AFNOR ou dans les documents du constructeur.
Si l'on prend l'exemple d'un canal ouvert type jaugeur à ressaut, voici quelques règles d'installation :




*Source CCTP autosurveillance ARSATESE – 2002*

Ainsi un ouvrage mal dimensionné, ou un capteur en mauvaise position, augmenteront l'incertitude sur la valeur finale du débit. Enfin les conditions d'accès et de sécurité doivent être prises en compte dès le début d'un projet pour faciliter l'entretien et le nettoyage des ouvrages ainsi que la maintenance des débitmètres (capteur & boitier de commande).

## Faire vérifier sa mesure de débit

Les mesures de débit installées à poste fixe dans des stations d'épuration ou réseaux d'assainissement sont susceptibles de dériver et de fournir à terme des valeurs erronées. Il est donc conseillé d'effectuer une validation périodique des ouvrages de mesure et des débitmètres par un organisme extérieur. Le laboratoire LCA propose des prestations adaptées à la vérification des mesures de débit, que ce soit sur les stations de traitement ou les réseaux de collecte. Ces prestations se font en toute indépendance des fournisseurs de débitmètres.

***Le LCA est accrédité par le Cofrac depuis le 1er janvier 2014 sur la réalisation des prélèvements d'eaux et mesures physico chimiques sur site. Il est notamment le premier laboratoire accrédité en France pour des prélèvements fractionnés avec asservissement à un débitmètre sur canalisation en charge.***

# [RSDE] PLATEFORMES DE COMPOSTAGE : PROFITEZ DE NOTRE EXPÉRIENCE

*Publié le 21 octobre 2010*

Toutes les plateformes de compostage soumises à autorisation ayant un rejet aqueux direct ou indirect dans le milieu naturel sont concernées par la seconde phase du programme national d'action contre la pollution des milieux aquatiques par certaines substances dangereuses (RSDE : Rejets de Substances Dangereuses dans l'Eau). Si vous êtes dans ce cas, vous devrez choisir un prestataire apte à répondre aux prescriptions imposées par la DREAL et l'Agence de l'Eau dont vous dépendez : accréditations, agréments, performances et expérience.
Accrédité COFRAC sur les eaux résiduaires (programme 100-1) depuis plus de 5 ans, LCA a développé au niveau national un ensemble de services opérationnels dédiés aux contrôles des eaux dans le milieu industriel, depuis le prélèvement, en passant par l'analyse, le conseil, et ce, jusqu'à l'assistance technique.

## AUJOURD'HUI, CETTE ACTIVITÉ EST DEVENUE UN AXE MAJEUR DE DÉVELOPPEMENT DU LABORATOIRE

- **Expérience :** réalisation de plus de 400 bilans de pollution en milieu industriel l'an dernier, 20 dossiers RSDE actuellement en cours.
- **Forte connaissance** du compostage et des process associés.
- **Compétences reconnue de nos chimistes** : LCA accrédité Cofrac sur les eaux usées, agrée par le MEEDDM, référencé par l'INERIS.
- **Accompagnement** de votre dossier tout au long de la campagne par des ingénieurs spécialisés en environnement et traitement des eaux expérimentés.
- **Rédaction** de la synthèse de campagne initiale.
- **Proximité** de nos agences et de notre réseau de prélèvement.

LCA mobilise tout son savoir faire pour proposer une solution complète vous permettant de vous reposer sur un prestataire expérimenté pour mener à bien ces nouveaux contrôles réglementaires. A votre écoute nous sommes également là pour vous conseiller.

# Ô RAGE, EAUX COMPOSTAGE

*Publié le 21 octobre 2011*

De 0 à 400 litres par tonne traitée… Ce sont les volumes des rejets (1) liquides liés au stockage ou au compostage sur plate-forme de traitement biologique des déchets (ADEME, 2005 (2)). Ces quantités varient d'un site à l'autre, suivant les matières traitées, le type de procédé (aération forcée positive, négative ou par retournement), la présence ou non d'un bâtiment. « Ces rejets liquides comprennent les jus ou lixiviats s'écoulant du produit par exfiltration, les eaux provenant du ruissellement sur la surface du produit, celles issues des surfaces annexes (plate-forme, voirie, toitures) plus ou moins souillées, les condensats dans le cas des bâtiments fermés ou en aération forcée négative, les eaux de lavage » (source : ADEME, 2005). La composition des rejets est forcément très dépendante de l'ensemble de ces paramètres.

Les volumes de rejets, plus ou moins chargés, peuvent représenter des quantités annuelles importantes. L'existence de « pics » liés aux conditions météorologiques rend parfois difficile la gestion de ces rejets.

## L'EAU ET LE COMPOST

Le compostage est un procédé biologique thermophile dont l'efficacité est fortement dépendante de la présence d'eau. Une trop faible humidité entraîne un ralentissement de la fermentation et de la maturation du compost. A l'inverse, un excès d'eau entraîne des risques d'anaérobiose, sources de mauvaises odeurs et de blocage dans les étapes biologiques de production d'un compost de qualité.

Ainsi, une même unité de compostage peut-elle se retrouver alternativement en période d'excès d'eau ou en période de déficit.

La plupart des unités de compostage sont équipées de bassins de rétention leur permettant de faire face aux périodes de déficit hydrique (arrosage des andains) et aux périodes d'excédents.

En cas d'excédents, ces jus doivent être évacués.

## QUE FAIRE DES REJETS LIQUIDES

Les principaux modes d'évacuation sont tous encadrés par des textes réglementaires imposant des contrôles de conformité :

> **Le rejet en réseau collectif d'assainissement** (autorisation/convention de rejet, réglementation ICPE)
> **Le dépotage en station d'épuration** (réglementation ICPE/convention de dépotage)
> **L'épandage** (conformité à la réglementation épandage)
> **Le traitement sur site avant rejet dans le milieu naturel** (conformité des rejets des ICPE).

**Pour les plateformes soumises à autorisation**, l'arrêté préfectoral d'autorisation d'exploiter basé sur les préconisations de l'arrêté ministériel du 22 avril 2008 encadre la gestion de l'évacuation des jus de la plateforme, que ce soit par épandage, rejet en milieu naturel ou en réseau collectif d'assainissement.

**Pour les unités soumises à déclaration**, l'arrêté ministériel du 12 juillet 2011 a fait évoluer les anciennes préconisations de l'arrêté précédent (7 janvier 2002).

## RSDE

Certaines plateformes soumises à autorisation d'exploiter et ayant un rejet direct ou indirect vers le milieu récepteur sont susceptibles de faire l'objet d'un arrêté préfectoral portant sur des prescriptions complémentaires sur les rejets de substances dangereuses dans le milieu aquatique (RSDE).

***> Une documentation complète est disponible auprès de notre service communication***

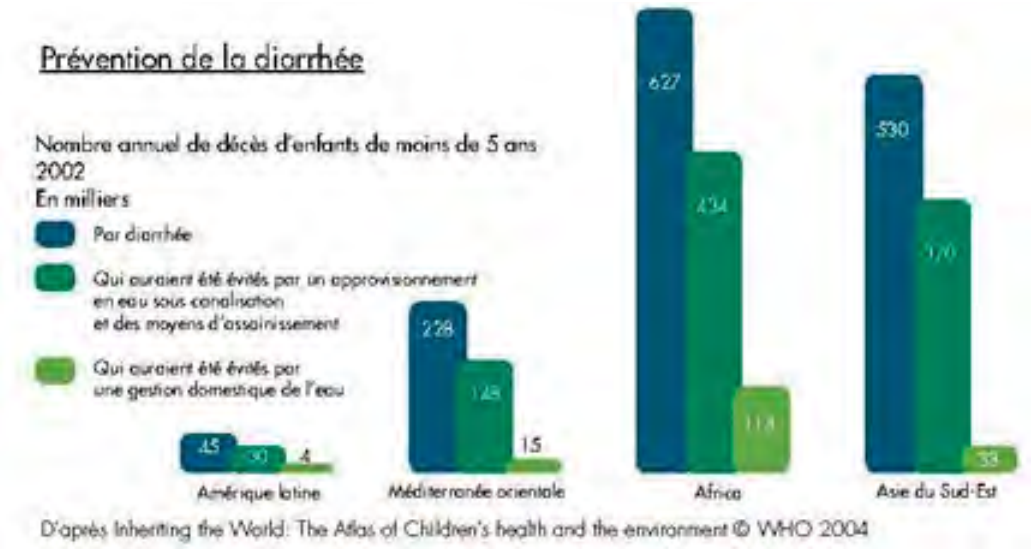
*(1) En fait, ces jus n'ont rien de commun avec des « thés de compost », qui seraient obtenus par un procédé s'apparentant à une infusion de compost mûr dans de l'eau.*

*(2) ADEME, 2005. Impacts environnementaux de la gestion biologique des déchets – Bilan des connaissances. Collection Données et Références, 331 pages.*

# HISTOIRE D'EAU

*Publication du 22 février 2013*

L'Organisation Mondial de la Santé (OMS) accorde une très grande importance à l'innocuité microbiologique des approvisionnements en eau de boisson. Selon cette organisation, 1.1 milliard de personnes à travers le monde sont dépourvues d'accès à des systèmes améliorés d'approvisionnement en eau. Ce manque d'accès à une eau de boisson sûre, allié à un assainissement insuffisant et au manque d'hygiène, est un facteur qui contribue largement aux 1.8 million de décès annuels pour cause de maladies diarrhéiques. Ces dernières touchent les personnes les plus fragiles et notamment les enfants de moins de 5 ans… L'une des principales étapes pour assurer la stabilité biologique de l'eau d'alimentation est la désinfection. Cette action est indispensable pour assurer la production et la distribution d'une eau conforme aux normes sanitaires.




## POURQUOI DÉSINFECTER L'EAU ?

Dans les pays Occidentaux, les risques épidémiques liés à la consommation d'une eau contaminée par des germes très virulents (à l'origine du choléra ou de dysenterie par exemple) ont quasiment disparus. Toutefois, il reste possible de retrouver des cas de contamination bactériologiques notamment sur des petites unités de production et réseaux de distribution. Les germes responsables sont surtout des bactéries du groupe des Entérobactéries, comme les salmonelles, shigelles ou encore Escherichia Coli.

Les ressources hydriques naturelles de surface ou peu profondes sont fréquemment impactées par les activités humaines. Les germes issus de système d'assainissement défectueux, de la présence d'animaux d'élevage à proximité des zones de captage, les réseaux de distribution anciens ou mal entretenus sont autant d'origines possibles.

L'eau naturelle est donc susceptible de contenir des micro-organismes qui, par leur nature et leur concentration, peuvent être acceptables, indésirables, voire toxiques ou dangereux. Par défaut, elle doit être considérée comme non utilisable directement en l'état pour la consommation humaine car sa qualité microbiologique peut varier à tout instant. Elle doit subir des traitements pour pouvoir être consommée sans danger par l'ensemble de la population. La désinfection et l'ajout de stabilisant bactérien (chlore par exemple) sont les étapes de traitement qui permettent d'éliminer les bactéries et virus pathogènes susceptibles de provoquer une maladie hydrique et de stocker l'eau sans risque de développement bactérien.

## NOTION DE POUVOIR DÉSINFECTANT

L'élimination des micro-organismes par un désinfectant répond à *la loi de CHICK – WATSON :* **Log10 (N/ N0) = k.Cn.Tm**

Avec : N : nombre de micro-organismes survivants
N0 : nombre initial de micro-organismes
Cn : Concentration du désinfectant
Tm : temps de contact
K : coefficient spécifique de létalité du désinfectant

La notion de couple (Cn x Tm) est donc essentielle.

## LA DÉSINFECTION AU CHLORE

Parmi les procédés chimiques, le chlore est sans conteste le plus connu et le plus utilisé.
Sa mise en œuvre se fait le plus souvent sous forme de gaz (Cl2) ou sous forme d'Hypochlorite de Sodium (eau de Javel NaClO).

- **Mode d'action du chlore**

En solution aqueuse et selon le pH, le chlore est dissocié principalement en deux formes : l'acide hypochloreux (HOCl) à pH acide et l'ion hypochlorite (ClO-) à pH alcalin.

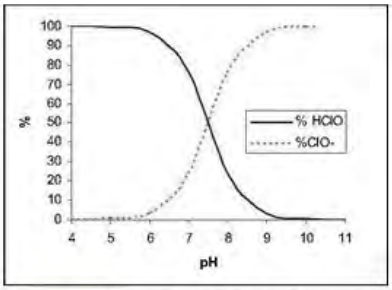
La différence essentielle entre ces deux formes repose sur l'efficacité désinfectante. Ainsi le chlore sous forme HOCl (appelé chlore libre actif) est **100 fois** plus efficace que le chlore sous forme d'ion hypochlorite (appelé chlore libre potentiel) !

En plus de ces propriétés désinfectantes, le chlore est également responsable de réactions chimiques que nous détaillons plus loin, interférant avec la désinfection.
L'utilisation du chlore en désinfection est en général privilégiée pour des pH inférieurs à 8.0.



[…]

[...]




*Variation des formes de Chlore libre en fonction du pH*

- **Les conditions pratiques d'une bonne désinfection au chlore**

Dans des conditions standards, la mise en œuvre du dosage de chlore est souvent appliquée comme ci-dessous :

| | Dose de chlore libre résiduel | Temps de contact |
|---|---|---|
| Action Bactéricide | 0.1 à 0.2mg/l | 10 à 15 minutes |
| Action Virulicide | 0.3 à 0.5mg/l | 30 à 45 minutes |

Le rôle du chlore libre résiduel est de maintenir une concentration suffisante en agent désinfectant tout au long du transport et de la chaine de distribution de l'eau potable. Cette notion est très importante. Il ne suffit pas de produire une eau potable en station. Il faut garantir sa conservation tout au long du réseau de distribution. La présence de chlore libre résiduel est la garantie d'une action désinfectante résiduaire en cas de risque de re-contamination dans le réseau de distribution. Il faut souligner que la concentration de l'eau en chlore injecté en station de production a tendance à décroître au cours du transport jusqu'aux points de distribution. C'est pourquoi, sur les réseaux de grande taille, il est recommandé d'installer des unités de rechloration, au niveau des stations de surpression, ou au niveau des réservoirs.

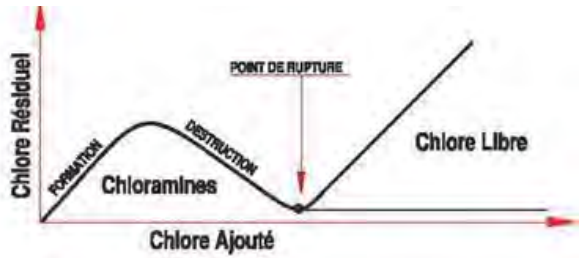
### + d'info : Chloration et Vigipirate

Dans le cadre du plan Vigipirate, les exploitants de stations ont des instructions pour renforcer la chloration de l'eau afin de prévenir tout risque de contamination malveillante. Par instruction ministérielle, les préfets de départements sont chargés de demander aux exploitants de toutes les unités de distribution d'eau, y compris celles qui jusqu'alors n'étaient pas traistées, de prendre les dispositions permettant d'assurer une concentration minimum en chlore libre résiduel de 0.3mg/l en sortie des reservoirs et de 0.1mg/l en tout point du réseau de distribution.

- **La demande en chlore :**

La présence de chlore résiduel libre implique d'avoir répondu à la « demande en chlore » de l'eau, due aux réactions chimiques avec les matières organiques et minérales. En effet, le chlore injecté va réagir rapidement avec des composés oxydables comme le fer et le manganèse, avec l'ammonium pour former des chloramines, ainsi qu'avec divers composés organiques.

La demande en chlore est établie par un essai, qui consiste à déterminer la quantité de chlore nécessaire pour que ce dernier soit entièrement utilisé à la désinfection de l'eau (appelé également détermination du point de rupture ou « break point »).




Le point de rupture est obtenu lorsque la quantité de chlore injecté correspond à celle de chlore libre résiduelle. Ce graphique illustre ces réactions dites « annexes » d'oxydation qui sont consommatrices de chlore. La formation et l'élimination des chloramines, issues de la combinaison entre l'ammonium (NH4) et le chlore, nécessitera 10 mg/l de chlore à raison d'un mg/l de NH4.

Compte tenu de ces réactions complexes entre le chlore et les composés présents dans l'eau à traiter, il est fondamental de connaître ses caractéristiques physico chimiques et bactériologiques grâce à une analyse complète en laboratoire avant de procéder à sa désinfection. Les eaux de surface et certaines eaux souterraines nécessitent le plus souvent bien plus qu'une simple chloration pour fournir une eau conforme aux normes de qualité.

- **La mesure du chlore libre résiduel :**

Lors de la réalisation de prélèvements d'eau sur le réseau de distribution, il est fort recommandé de procéder à la mesure de ce chlore libre résiduel. Cette mesure doit être réalisée sur site, au moment du prélèvement et non au laboratoire. La norme NF EN ISO 5667-3 relative aux lignes directrices pour la conservation et la manipulation des échantillons d'eau préconise une mesure dans les 5 minutes qui suivent le prélèvement au maximum. La phase de transport, même courte, altère la mesure. Une analyse en laboratoire ne présente aucun intérêt. Les techniciens préleveurs LCA réalisent ce type de mesure lors de leurs interventions sur réseau de distribution.

## AUTRES TECHNIQUES DE DÉSINFECTION

Depuis plusieurs années, d'autres techniques de désinfection se sont développés en alternative au chlore.

**> les procédés physiques par séparation membranaire** (ce qui fera l'objet d'un prochain article dans Agro Reporter). En fonction du seuil de coupure de l'installation (on parle de microfiltration, d'ultrafiltration et de nanofiltration), les bactéries et virus sont retenus sur les membranes. Toutefois, une désinfection complémentaire au chlore par exemple est souvent associée par sécurité.

**> la désinfection par l'irradiation UV.**
Le principe est celui de l'irradiation par le rayonnement UV, ces derniers étant absorbés par l'ADN et l'ARN des germes. Cette exposition entraîne la mort des cellules. Les rayons UV sont fournis par des lampes protégées dans des gaines de quartz, émettant un rayonnement à 254 nm de longueur d'onde.
La dose appliquée est fonction de l'intensité d'irradiation UV (puissance des lampes) et du temps de contact eau/lampe.
L'opération de désinfection consiste à faire passer l'eau à traiter sur les lampes en régulant le débit, l'épaisseur de la lame d'eau et la chute de puissance des lampes au cours du temps.
Ce mode de désinfection est régulièrement utilisé dans de nombreuses applications. Il est toutefois souhaitable de respecter certaines conditions de fonctionnement :
- l'eau traitée doit être faiblement chargée en Matières En Suspension (MES) et en matières organiques pour éviter une diminution de l'efficacité de l'irradiation.
- un temps de distribution relativement court entre la production et le consommateur car les UV n'ont pas d'effet rémanent, contrairement au chlore.

**> Autres oxydants chimiques comme l'ozone (O3)**
L'ozone est un oxydant et désinfectant plus puissant que le chlore.
A concentration égale, l'action virulicide de l'Ozone ne nécessite que 4 minutes au lieu des 30 minutes nécessaires au Chlore. Toutefois son application en eau potable reste cantonnée à des installations spécifiques, compte tenu des coûts d'investissement et d'exploitation importants à mettre en œuvre (installation d'un générateur d'ozone sur site).

# LE BEC DANS L'EAU

*Publication du 27 juin 2013*

L'eau représente environ 2/3 du poids d'un adulte humain. Cet ordre de grandeur, également applicable aux autres animaux à sang chaud, est à mettre en relation avec le rôle essentiel de l'eau qui intervient dans toutes les fonctions physiologiques de base de l'organisme. D'un point de vue biologique, l'eau est un nutriment, « une substance organique ou minérale, directement assimilable sans avoir à subir les processus de dégradation de la digestion » (dictionnaire Larousse). En cela elle se distingue de l'aliment qui n'est pas obligatoirement assimilable directement par l'organisme. Quelles que soient les espèces, l'eau est consommée en quantités beaucoup plus importantes que n'importe quel autre nutriment. En zootechnie, sa disponibilité et surtout sa qualité sont des paramètres clés dans la santé et la productivité d'un élevage.

## QUALITÉ DE L'EAU ET PRODUCTIVITÉ

On conçoit facilement qu'une restriction des quantités d'eau disponibles entrainera rapidement une chute de la productivité d'un atelier d'élevage. Il est moins fréquent de s'intéresser à la qualité de l'eau fournie aux animaux. Or, une eau d'abreuvement de mauvaise qualité (gustativement altérée car trop chargée en fer par exemple) est souvent un facteur participant à la baisse de sa consommation, et donc à une chute possible de production. A contrario, si elle est consommée en grandes quantités, les contaminants qu'elle contient peuvent atteindre un niveau nocif pour l'animal.

Les besoins et la sensibilité à la qualité de l'eau des animaux varient en fonction des espèces, de l'état des animaux, de leur mode de production, et de l'environnement ou du climat (voir par exemple l'évolution des besoins en eau du poulet en fonction de la température : tableau 1) dans lequel ils évoluent.

**Tableau 1 : Consommation d'eau journalière par les poulets à griller**

| Âge des poulets à griller (semaines) | Besoins en eau (L/1000 oiseaux/jour) | |
|---|---|---|
| | 21 °C | 32 °C |
| 1-4 | 50-260 | 50-415 |
| 5-8 | 345-470 | 550-770 |

*Source: Commercial chicken production manual, Van Nostrand Reinhold, 1990.*

L'alimentation des animaux et leur niveau de production, notamment en élevage laitier, va aussi influencer de façon sensible les quantités d'eau d'abreuvement consommées.

**Tableau 2 : Consommation d'eau journalière des vaches laitières, en fonction de leur production**

| Types de fourrages | Teneur en MS des fourrages en % | Quantité d'eau totale ingérée (L/j) | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | Vache tarie | Vache en production | | |
| | | | Kg de lait par vache par jour | | |
| | | | 20 | 30 | 40 |
| Herbe ou ensilage directe | 15 à 25 | < 30 | 40 | 60 | 80 |
| Ensilage de maïs+ concentré | 40 | < 40 | 60 | 80 | 100 |
| Foin + ensilage, paille ou foin avec ou sans concentré | > 60 | < 40 | 70 | 90 | > 100 |

*Source : ANSES 2010 « Etat des lieux des pratiques et recommandations relatives à la qualité sanitaire de l'eau d'abreuvement des animaux d'élevage – Annexe 1 ».*

La maîtrise de la qualité de l'eau d'abreuvement est un donc un facteur majeur, mais parfois mésestimé, de l'obtention de performances en élevage. La tolérance aux minéraux (sels totaux) dans l'eau potable varie selon les espèces animales. Les volailles y sont le plus sensibles, suivies des porcs et des ruminants. Une teneur en sels solubles totaux de moins de 1000 mg/L est généralement considérée comme faible et convient à tous les genres d'animaux d'élevage (1) . Des teneurs en sels qui se situent entre 1000 et 3000 mg/L sont acceptables pour toutes les espèces d'animaux d'élevage, mais ces niveaux peuvent causer des déjections liquides chez les volailles ou de la diarrhée chez le bétail qui n'est pas habitué à de telles teneurs en sels. Toute concentration en sels supérieure à 3000 mg/L est déconseillée pour les volailles; elle peut aussi entraîner le refus de s'abreuver chez les autres animaux d'élevage (1). Par ailleurs, des concentrations de sels dépassant 7000 mg/L sont déconseillées pour tout genre d'animaux d'élevage, cette valeur étant abaissée à 5000 mg/L pour les animaux en lactation.

## ETAT DES LIEUX EN L'ABSENCE DE RÉGLEMENTATION

En France, l'eau d'abreuvement des animaux n'est pas considérée comme un aliment. Les exigences réglementaires liées à la qualité des aliments ne lui sont donc pas applicables. Parallèlement, il n'existe pas de réglementation spécifique pour l'eau d'abreuvement. L'ANSES (Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail) a publié en février 2011 une étude scientifique faisant un état des lieux des pratiques et des recommandations relatives à la qualité sanitaire de l'eau d'abreuvement des animaux d'élevage.

## RECOMMANDATIONS DE L'ANSES

Cet état des lieux débouche sur la rédaction d'une synthèse des paramètres et critères de qualité. Les paramètres à rechercher sont :

- soit des paramètres indicateurs devant servir de signal d'alerte en cas de dépassement, sans toutefois avoir forcément de conséquence directe sur la santé animale ou la salubrité des denrées animales produites (paramètres d'alerte) ;

- soit des paramètres dont le dépassement présente un risque pour la santé animale ou la salubrité des denrées animales produites (paramètres à risque).

Ce rapport de l'ANSES aboutit également à des recommandations portant entre autres sur les modalités de contrôles de la ressource en eau (fréquence des analyses, nature des analyses). Lien vers les recommandations de l'ANSES. Il permet également de comparer ces recommandations aux critères de qualité de l'eau d'abreuvement existants.

Enfin il est primordial d'insister sur la nécessaire maîtrise de la qualité de l'eau circulant dans les réseaux de distribution à l'intérieur de l'élevage, notamment de l'eau chaude. En effet, des réseaux mal entretenus (réservoirs, tuyauterie) peuvent également être à l'origine de contaminations microbiologiques par le développement de biofilms post traitement. Outre la désinfection régulière de ces réseaux, un contrôle de la teneur en chlore libre et de chlore total est souvent préconisé en élevage hors sol.

L'analyse des eaux d'abreuvement, rarement pratiquée dans le passé, devient aujourd'hui un contrôle indispensable pour les éleveurs. Il vise principalement à permettre une prévention des maladies chez les animaux d'élevage. C'est un moyen simple et peu onéreux pour s'assurer que l'eau distribuée aux animaux ne véhicule pas de pathogènes ou d'éléments susceptibles d'affaiblir les animaux et donc d'altérer la qualité et la rentabilité d'un atelier. Ce type d'analyse intéresse tous les types d'élevage, depuis l'élevage hors-sol jusqu'aux vaches laitières ou aux canards à gaver.

# LES BOUES STEP BY STEP

*Publication du 13 décembre 2012*

La ville de Clichy fut la première à être dotée d'une station d'épuration en France. C'était à la fin du 19ème siècle. Aujourd'hui ces ouvrages, dont le nombre dépasse les 3 000 dans notre pays, font partie de notre environnement. Ils ont pour mission d'assainir, donc littéralement de rendre « saines », les eaux usées que nous rejetons dans nos activités domestiques et professionnelles.

La qualité d'une station d'épuration se mesure tout d'abord par son efficacité à épurer les eaux sales avant de rejeter une eau propre dans le milieu naturel (en rivière le plus souvent). Les stations d'épuration sont des acteurs fondamentaux de la préservation de notre environnement et de notre santé en limitant l'impact de nos rejets sur la qualité du milieu et de la ressource. Plus récente est la prise en compte de la capacité d'une station d'épuration à produire des boues de qualité. Aujourd'hui, la gestion de ce sous-produit de l'épuration est devenu un enjeu économique majeur des exploitants. Garantir l'innocuité, et la production de boues à fort intérêt agronomique, permet au gestionnaire de s'offrir de multiples voies de valorisation.

Ainsi, en « nettoyant» l'eau, les stations d'épuration produisent des « boues ». Cette filière boue est l'autre visage peut-être moins connu de la station d'épuration.

## NOTION DE FLOC

Les eaux résiduaires contiennent des matières en suspension, organiques ou non, qui se déposent dans le fond du bassin simplement par gravité. Ces dernières y sont raclées et évacuées formant ainsi les boues primaires. Mais cette épuration ne suffit malheureusement pas. En effet, les eaux résiduaires contiennent une part importante de matières organiques non décantables, composées de colloïdes caractérisés par leur faible taille et leur charge électronégative qui engendrent des forces de répulsion intercolloïdales. Ainsi, si le temps de décantation d'un gravier dans un mètre d'eau est de 1 seconde par la seule influence de son poids, on passe à 2 minutes pour le sable fin, à 2 heures pour l'argile, à 8 jours pour une bactérie, de 2 à 200 ans pour un colloïde.
Pour déstabiliser cette suspension, il faut tout d'abord favoriser l'agglomération des colloïdes en diminuant leurs forces de répulsion électrostatique.

C'est la phase de coagulation. Elle s'obtient le plus souvent par l'addition dans l'eau d'un coagulant à base de sel de fer ou d'aluminium. La charge trivalente (Fe+++ ou Al+++) neutralise les charges électriques superficielles répulsives, et permet ainsi agglomération des colloïdes. L'agglomération par pontage des particules colloïdales ainsi « déchargées » constitue des micro-flocs. Ces derniers s'agrégent les uns aux autres pour constituer des flocons plus volumineux, jusqu'à devenir décantables par gravité. Le floc est ainsi constitué. Le grossissement de ce dernier peut être encore accéléré s'il est mis en contact avec des précipités déjà formés. C'est là qu'intervient la recirculation des boues préalablement décantées. Un brassage lent de l'ensemble augmente les chances de rencontre des particules colloïdales avec le floc.

## POURQUOI TRAITER LES BOUES ?

Les boues constituent donc le principal déchet d'épuration des eaux résiduaires. On y retrouve principalement les matières en suspension décantables et les boues biologiques en excès issues du traitement des eaux, comprenant dans leurs flocs la biomasse ainsi que les matières solides non dégradée. A ce stade, la plupart des boues sont très liquides (0.5 à 5 % de matières en suspension), et présentent un caractère fermentescible. Stockées en l'état, elles deviennent nauséabondes. Toutes les boues vont nécessiter un traitement quelles que soient les filières de valorisation ou de d'élimination envisagées.

Le choix des techniques se fera :

- en fonction de leur caractère organique ou minérale (teneur en matière organique), et de leur caractère plus ou moins hydrophile. Le caractère organique entraînera l'application d'un traitement de stabilisation, le caractère plus ou moins hydrophile conditionnera la plus ou moins grande difficulté à les déshydrater.

- en fonction de leur destination, encadrée par une réglementation environnementale de plus en plus stricte.

## DIFFÉRENTES TECHNIQUES DE TRAITEMENT DES BOUES

Le tableau ci-dessous présente des techniques conventionnelles de traitement de boues régulièrement rencontrées sur les installations d'épurations urbaines et industrielles.

[...]

[...]

| Techniques de déshydratation | Principe |
|---|---|
| Lagunage | Ajout d'un floculant sur boues liquides après ajout de floculants |
| Centrifugation | Séparation de la phase solide de la phase liquide par mise en rotation de la boue centrifuge. La centrifugabilité de la boue est conditionnée par l'ajout de polymères. |
| Filtration à bandes presseuses | Table filtrante formant un cake et empruntant la boue préalablement égouttée, dans un « sandwich » qui s'écoule successivement autour de tambours perforés et de rouleaux. |
| Filtres presses | Séparation de la phase liquide-solide sous forte pression. Système de déshydratation mécanique permettant l'obtention des siccités les plus élevées. |

Dans les procédés listés ci dessus, l'utilisation d'un floculant (polymère) permet d'accélérer la séparation eau / boues et donc d'améliorer le rendement des machines. Sachant qu'il existe différentes compositions de produit, le choix du floculant se fera en fonction de la nature des boues (minérale, organique, mixte) et du dispositif d'épaississement/déshydratation en place (résistance des flocs à la pression, au cisaillement…). La quantité de polymère utilisée peut être comprise entre 3 et 10 kg par tonne de matières sèches selon les procédés.

Quelle que soit la technique de déshydratation utilisée, il est important de vérifier la qualité de l'eau issue de la séparation des phases solides et liquides, appelée généralement « filtrat ». Elle doit être peu chargée en matières en suspension (MES) afin d'éviter des retours de boues dans la filière eaux.

- La stabilisation

| Types de stabilisation | Détails |
|---|---|
| Stabilisation biologique | Procédé visant à réduire la teneur des boues en matières fermentescibles : • par voie aérobie (en présence d'oxygène) dans les bassins d'aération ou dans des bassins de stabilisation aérobie. On obtient des boues « aérobies » ou « stabilisées aérobies ». • par voie anaérobie (absence d'oxygène) dans des digesteurs (méthanisation) avec production d'un biogaz riche en méthane. On obtient des boues « digérées », ou « anaérobies » ou « stabilisées anaérobies ». |
| Compostage | Procédé particulier de stabilisation biologique aérobie. Il se réalise de préférence sur des boues partiellement déshydratées. Les boues compostées ont un aspect de « terreau » et présentent une structure solide ; elles sont stables, facilite la gestion de flux. Le compost peut faire l'objet d'un plan d'épandage sur lots d'une conformité à la norme NF U44095. |
| Stabilisation chimique | Bloque l'activité biologique, et donc l'évolution de la boue, par adjonction d'une quantité importante de chaux (10 à 50 % de la matière sèche, en général 30 %) élevant le pH au delà de 12. Le chaulage suppose généralement une déshydratation préalable des boues, sauf dans le cas de filtre-presse où un lait de chaux est mélangé aux boues liquides. |
| Séchage thermique | Réalise un effet temporaire de stabilisation par absence d'eau, persistant aussi longtemps que les boues ne sont pas réhumectées. Le séchage se pratique généralement sur des boues déjà déshydratées mécaniquement (centrifugées, pressées). |

Souvent, chaulage et compostage se pratiquent sur des boues déjà stabilisées biologiquement en station d'épuration. Ils constituent en quelque sorte un traitement complémentaire de stabilisation. Toutefois, pour des boues primaires ou physico-chimiques, ce sont les uniques modes de stabilisation.

- L'hygiénisation

L'arrêté du 8 janvier 1998 sur l'épandage des boues d'épuration définit l'hygiénisation comme un « traitement qui réduit à un niveau non détectable les agents pathogènes présents dans la boue ». Une boue est considérée comme hygiénisée quand, à la suite d'un traitement, elle satisfait aux exigences définies dans le tableau ci-dessous.

| Paramètres | Valeurs seuil de l'arrêté du 8 janvier1998 |
|---|---|
| Salmonelles | < 8 NPP / 10 g MS |
| Œufs d'helminthes pathogènes viables | < 3 / 10 g MS |
| Entérovirus | < 3 NPPUC / 10 g MS |

Outre le suivi de ces paramètres lors de la caractérisation initiale avant épandage, l'efficacité des traitements d'hygiénisation est également appréciée par l'analyse des coliformes thermotolérants (indicateur). L'hygiénisation des boues ne s'impose que dans certains contextes d'utilisation agronomique sensibles (voir annexe II de l'arrêté du 8 janvier 1998). La plupart des boues épandues en France ne sont pas hygiénisées, la maîtrise du risque sanitaire reposant de façon satisfaisante sur l'application de règles de bonnes pratiques.

# ROSEAUSPHERE

*Publié le 3 mai 2012*

L'épuration des eaux usées urbaines par Filtres Plantés de Roseaux (FPR) est devenue ces dernières années une technique très répandue pour les petites et moyennes collectivités.
Ainsi, ce système « rustique » se retrouve sur de nombreux ouvrages collectifs dont la capacité de traitement va de 100 à 1500 eq.hab[i] (voir plus sur certaines stations).
Il existe de nombreuses variantes dans l'utilisation des FPR, comme la combinaison avec d'autres types de traitement (lagunage par exemple) ou le sens de filtration (vertical ou horizontal). La filière la plus couramment utilisée, et dont nous allons développer le principe, est la filtration verticale sur lits plantés de roseaux en double étage.

## PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DES FPR

Les filtres plantés de roseaux appartiennent à la catégorie des traitements par « culture fixée sur supports fins ».
Les bactéries fixées sur le support assurent la dégradation de la matière organique et la rétention des Matières En Suspension, et cela en milieu aérobie (ventilation par drains).

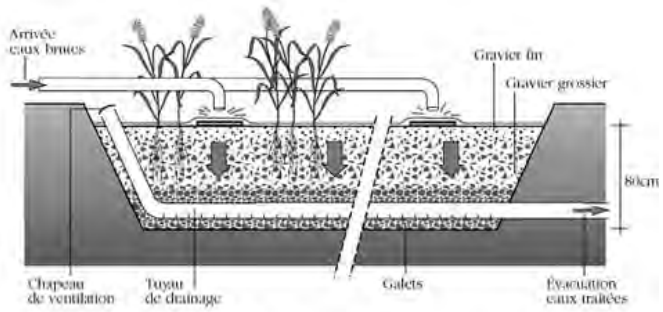



Schéma d'un filtre à écoulement vertical
(source : Groupe de travail « Macrophytes et Traitement des eaux », 2005)

Le rôle des roseaux (Phragmites Australis) en surface des filtres est avant tout un rôle « mécanique ». Grâce à leurs racines tubulaires et aux nouvelles tiges qui poussent à travers les boues accumulées, les roseaux permettent de limiter le colmatage dû à l'accumulation des boues en surface du filtre. On parle alors de l'implantation d'une « rhizosphère ».

## FILIÈRE DE TRAITEMENT ET DIMENSIONNEMENT

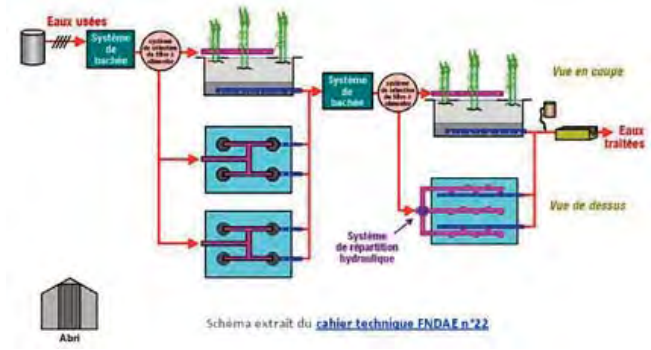



Schéma extrait du cahier technique FNDAE n°22

Le schéma suivant illustre la filière de traitement d'un double étage de filtres à flux vertical.

Plusieurs cahiers techniques de dimensionnement et de préconisation ont notamment été réalisés par l'IRSTEA (anciennement Cemagref) et sont consultables sur internet.

**De manière générale on retiendra les éléments suivants :**

- base de dimensionnement : 2 m2/hab avec 1,2 m2 /hab sur le premier étage et 0,8 m2 sur le deuxième étage de filtration.
- respect des consignes sur le type et la granulométrie des supports : gravier en 1er étage puis sable en 2ème étage.
- débit d'alimentation minimum des filtres par bâchée : maintenir un minimum de 0,5 m3/m2/h, afin de permettre une meilleure répartition des effluents.

## ENTRETIEN ET EXPLOITATION

Cette filière de traitement ne nécessite pas de moyens techniques importants. La gestion des boues produites est facilitée (une seule extraction sur plusieurs années en fonction de la charge). La qualité attendue des rejets sur ce type de filière est de l'ordre de :

- DCO < 90 mg/l
- DBO5 < 25 mg/l
- MES < 30 mg/l
- NTK < 20 mg/l

Il n'en demeure pas moins qu'un suivi et un entretien régulier sont nécessaires au bon fonctionnement des filtres.
On citera notamment l'entretien du dégrilleur en entrée de station, le désherbage manuel pour privilégier la pousse des roseaux si nécessaire, le suivi des bâchées et la rotation d'alimentation des filtres…

Un suivi régulier de la qualité des boues accumulées est également utile (métaux notamment) afin de s'assurer à terme de leur compatibilité avec la réglementation relative à l'épandage agricole.

*[i] 1 eq.hab : pollution théorique émise par un habitant par jour soit 150 litres ; 80 g MES ; 60 g DBO5; 15 g Azote et 4 g Phosphore*

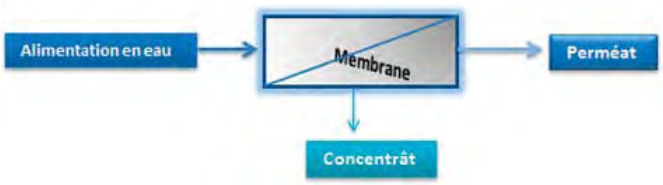
# TRAITEMENT DE L'EAU : L'ARRÊT AU PORE

*Publié le 6 mars 2014*

L'utilisation de la technologie membranaire connait un essor important ces dernières années dans le traitement des eaux que ce soit pour l'eau potable, les eaux usées urbaines ou les eaux industrielles. L'amélioration de la qualité des eaux traitées, l'évolution de la réglementation ainsi que la prise en compte de nouvelles substances dans l'eau contribuent en partie au développement et à l'utilisation des membranes. Ce développement a permis de diversifier les différentes filières membranaires proposées par les constructeurs, et en parallèle d'améliorer les conditions d'utilisation et d'exploitation des installations. Dans cet article, l'AgroReporter présente une synthèse des techniques membranaires utilisées en traitement de l'eau, leurs avantages et leurs contraintes.

## Terminologie membranaire

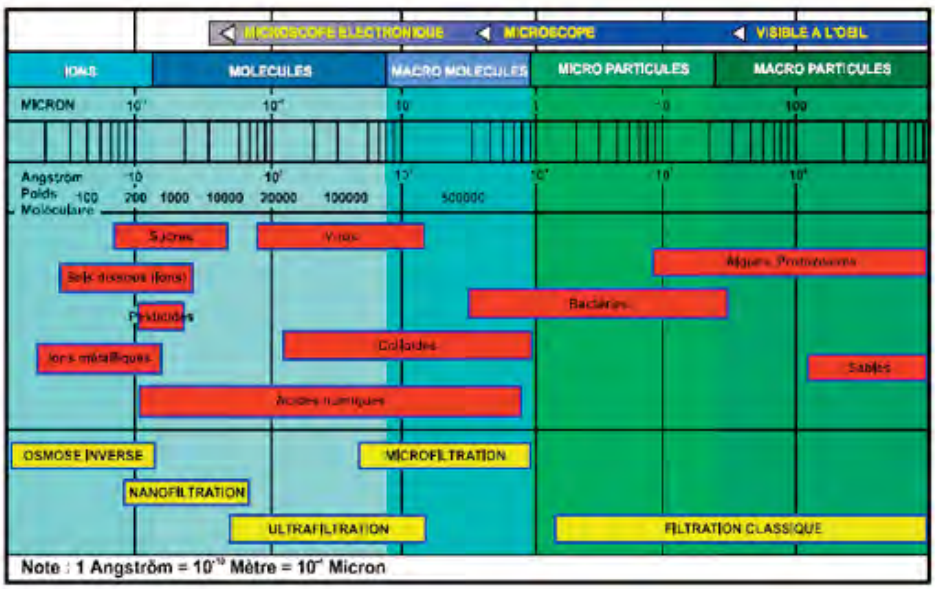
Les membranes sont utilisées dans le traitement de l'eau en qualité de barrières minces semi-perméables. Un procédé physique de séparation va s'opérer, dans lequel la membrane va jouer le rôle de barrière sélective en fonction de la taille des pores choisie. Lors de cette sélection, deux phases sont obtenues :
- le **Concentrat**, correspondant au fluide enrichi des substances retenues par la membrane
- le **Perméat**, correspondant au fluide et aux substances passées à travers la membrane.




Afin d'accélérer cette séparation de phases, une force motrice est appliquée de part et d'autre de la membrane : cela peut être la pression, un champ électrique, un gradient de température ou une différence de concentration. Les installations les plus courantes de traitement des eaux potables et d'eaux usées utilisent la pression comme force motrice.

## Champ d'application

Le tableau ci-dessous montre le champ d'application des techniques de séparation membranaire en fonction de différentes substances et de la taille des pores (exprimées généralement en microns).



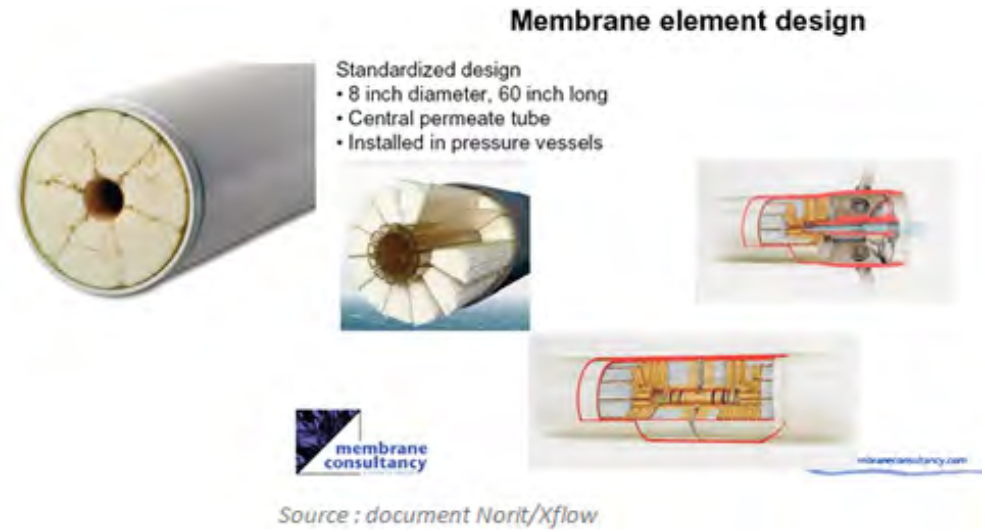

- **La microfiltration** utilise des membranes dont les diamètres de pores sont compris entre 0.1 et 1 µm microns (µm). Cette technique permet la rétention des particules en suspension, de bactéries ainsi que des colloïdes fixés par précipitation ou coagulation sur de plus grosses molécules. Son application peut se retrouver dans différents procédés de traitement des eaux potables, eaux usées urbaines et industrielles.
- **L'ultrafiltration** utilise des membranes dont les pores sont compris entre 0.01 à 0.1 µm. Ces membranes retiennent les molécules dont la masse molaire est élevée (une partie des acides humiques et des colloïdes) et les virus. Les sels dissous (ions) traversent la membrane. Son application est également adaptée à l'ensemble des matrices.
- **L'osmose inverse** utilise des membranes denses qui arrêtent tous les sels. L'osmose est un phénomène tendant à équilibrer la concentration en solutés de part et d'autre de la membrane semi perméable. Le solvant diffuse du milieu le moins concentré en solutés vers le milieu le plus concentré sous l'effet de la pression osmotique. Pour inverser le passage du solvant comme dans cette technique, il faut alors appliquer une pression supérieure à la pression osmotique. L'osmose inverse est utilisée dans le cadre du dessalement d'eau de mer et des eaux saumâtres, de la production d'eau ultra pure, et de la production d'eau de process.
- **La nanofiltration** se situe entre l'osmose inverse et l'ultrafiltration. Elle permet la séparation de composants en solution dont la taille est voisine du nanomètre (0.001 µm). Ainsi les sels ionisés multivalents de masse molaire supérieure à 200-250 g/mol sont retenus par ce type de membrane (calcium, magnésium, sulfates…).

## Structure et disposition des membranes

Il existe principalement sur le marché deux types de matériaux constituant les membranes :
- Les membranes minérales à base de composés inorganiques (céramiques, verre, métal). Elles sont particulièrement adaptées aux effluents dont les pH et températures peuvent être extrêmes.
- Les membranes composées de matériaux organiques. Ce sont les plus utilisées en micro et ultrafiltration. Les principaux polymères organiques utilisés sont l'acétate de cellulose, les composés de type Polyamide et de type Polysulfone. Chaque composé organique possède une sensibilité différente aux propriétés physico-chimiques de l'eau à traiter (pH, température, chlore…), qui doivent donc être prises en compte en amont d'un projet d'utilisation de membranes.
(...)

(...)
Chaque type de membrane est caractérisé par le flux maximal d'eau qu'elle est en mesure de traiter, exprimé en litres par m2 et par heure, appelé flux de perméation.
En prenant le flux de perméation en compte, la constitution d'une unité de traitement nécessite généralement l'utilisation de grandes surfaces membranaires. On parle alors de constitution de modules où l'on va regrouper un certain nombre de membranes.
En fonction des applications sur le traitement de l'eau ou les propositions techniques des constructeurs, les membranes peuvent être agencées en module fibres creuses, tubulaires, en module plans ou spiralés.
Dans l'exemple ci-dessous est représenté un module constitué de fibres creuses qui sont noyées dans une résine époxy. Il s'agit ici de membranes organiques (Polysulfone). Un module contient plusieurs milliers de fibres lui conférant plusieurs m2 de surface filtrante.

## Les contraintes de l'utilisation des membranes




Source : document Norit/Xflow

Si les filières de traitements membranaires apportent une meilleure filtration que les techniques de traitement plus conventionnelles, sa principale contrainte réside dans l'accumulation de matières dans les pores ou à sa surface.

C'est le phénomène de colmatage. Le flux de filtration s'en trouve alors diminué, impactant le fonctionnement de l'installation.

Le mode de colmatage et son intensité dépendront des propriétés physico-chimiques du fluide à traiter.
Afin de limiter ce phénomène, on procède à des rétro-lavages réguliers avec de l'eau traitée ainsi qu'à des lavages chimiques dont la nature est fonction du type d'encrassement. Ces lavages ont lieu jusqu'au rétablissement du flux initial des membranes.

Certains indicateurs de suivi permettent de contrôler le bon fonctionnement des membranes et leur éventuel colmatage :
• **la pression transmembranaire**, correspondant à la perte de charge créée par le débit traité à travers la membrane et les matières déposées sur celle-ci.
• **la perméabilité,** qui est le rapport du flux de perméation (L/m2.h) et de la pression transmembranaire (exprimée en Bar et à une température donnée).
Ainsi lorsque la perméabilité baisse en fonction du temps, c'est souvent le signe d'un colmatage entraînant une réduction de la performance de la membrane.

***Les technologies membranaires utilisées dans le traitement des eaux sont sûres et performantes.***
***Cependant, qu'elles soient utilisées en traitement principal ou en traitement complémentaire avec d'autres filières, un suivi particulier est à mettre en place, adapté aux propriétés du fluide à traiter qui peuvent varier dans le temps. Ainsi la surveillance et la gestion du colmatage des membranes sont essentielles afin de limiter les risques de disfonctionnement et les conséquences financières induites.***
***On notera également que la prise en compte de la gestion des concentrats ne doit pas être négligée dans certaines applications (osmose inverse par exemple). Le laboratoire LCA est en mesure de réaliser toutes les analyses liées au fonctionnement de ces installations, mais propose également des audits et du conseil à l'exploitation de ce type d'unités, de traitement***

# BOUE TABOUE

*Publié le 29 mars 2012*

Pour être valorisées en agriculture, les boues d'épuration doivent respecter les valeurs limites imposées par l'arrêté ministériel du 8 janvier 1998 lorsqu'elles proviennent de stations urbaines, par l'arrêté ministériel du 2 février 1998 lorsqu'elles sont issues de stations industrielles ou par l'arrêté sectoriel du 3 avril 2000 lorsqu'il s'agit de boues de l'industrie papetière. Quel devenir pour les boues dépassant ces valeurs seuils ?

**Teneurs limites en vigueur pour les boues urbaines, industrielles ou papetières valorisées en agriculture**

| Éléments-traces métalliques | Valeur limite dans les boues (mg/kg MS) |
|---|---|
| Cadmium | 10 (1) |
| Chrome | 1 000 |
| Cuivre | 1 000 |
| Mercure | 10 |
| Nickel | 200 |
| Plomb | 800 |
| Zinc | 3 000 |
| Chrome + cuivre + nickel + zinc | 4 000 |

| Composés-traces organiques | Valeur limite dans les boues (mg/kg MS) (3) | |
|---|---|---|
| | Cas général | Epandage sur pâturages |
| Total des 7 principaux PCB (2) | 0,8 | 0,8 |
| Fluoranthène | 5 | 4 |
| Benzo(b)fluoranthène | 2,5 | 2,5 |
| Benzo(a)pyrène | 2 | 1,5 |

*(1) Depuis le 1er janvier 2004*
*(2) PCB 28, 52, 101, 118, 138, 153, 180*
*(3) Arrêté du 3 juin 1998*

## LA SOLUTION ISDND

En France, hormis l'incinération et les traitements thermiques par voie humide (système OVH), les boues et autres déchets organiques non valorisables en agriculture sont susceptibles d'être orientés vers des installations de stockage de déchets (alternative moins coûteuse que les 2 options précédentes). Tout comme les déchets de bois non valorisables, les boues d'épuration urbaines sont potentiellement acceptables dans les installations de stockage de déchets non dangereux (ISDND). Certaines boues industrielles sont également acceptables dans ces installations. Toutefois, l'acceptation en ISDND n'est pas systématique. Des critères stricts d'admission doivent être respectés.

## Règles d'admission des déchets en ISDND

Les ISDND sont des Installations Classées pour la Protection de l'Environnement (ICPE) soumises à autorisation, quel que soit leur volume d'activité. Un arrêté préfectoral spécifique d'autorisation d'exploiter leur a donc été délivré. Cet arrêté est établi à partir des préconisations de l'arrêté ministériel du 9 septembre 1997 et de celles issues de l'étude d'impact qui figure dans le dossier de demande d'autorisation. Cette dernière précise, notamment, la nature et l'origine des déchets qui seront potentiellement admis. L'annexe II de l'arrêté ministériel liste les déchets qui ne peuvent pas être admis.

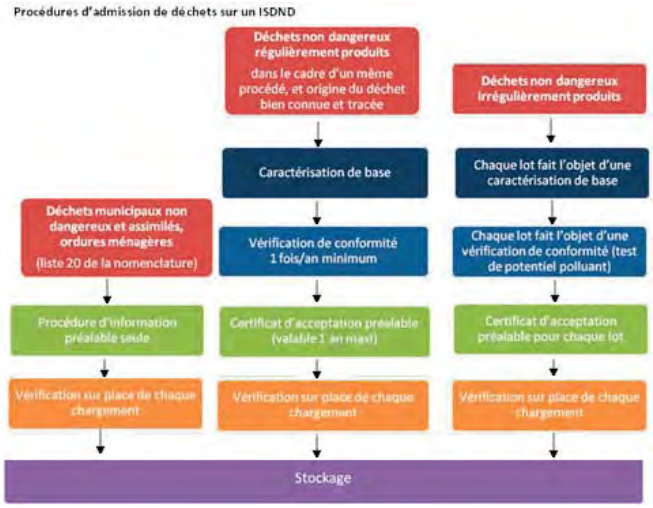
Concernant les boues, il est utile de préciser que si elles présentent un taux de matière sèche inférieur à 30% (taux d'humidité supérieur à 70%), elles ne seront pas admises en l'état. Une dessiccation complémentaire sera nécessaire.

L'arrêté d'autorisation d'exploiter de l'ISDND indique donc précisément les déchets qui pourront effectivement être stockés dans l'installation. Il établit également les règles d'exploitation du site et celles liées à l'admission des déchets.

Pour être admis dans une installation de stockage, les déchets doivent également satisfaire :

> à la procédure d'information préalable (déchets municipaux non dangereux et assimilés) ou à la procédure d'acceptation préalable (autres déchets non dangereux),

> au contrôle à l'arrivée sur le site (systématique).


Procédures d'admission de déchets sur un ISDND
Déchets non dangereux régulièrement produits
dans le cadre d'un même procédé, et origine du déchet bien connue et tracée
Déchets non dangereux irrégulièrement produits
Caractérisation de base
Chaque lot fait l'objet d'une caractérisation de base
Déchets municipaux non dangereux et assimilés, ordures ménagères
(liste 20 de la nomenclature)
Vérification de conformité 1 fois/an minimum
Chaque lot fait l'objet d'une vérification de conformité (test de potentiel polluant)
Procédure d'information préalable seule
Certificat d'acceptation préalable (valable 1 an maxi)
Certificat d'acceptation préalable pour chaque lot
Vérification sur place de chaque chargement
Vérification sur place de chaque chargement
Vérification sur place de chaque chargement
Stockage

## QUID DES BOUES

Les boues d'épuration urbaines non valorisables en agriculture, ainsi que les boues industrielles ne contenant pas de substances dangereuses sont des déchets DITS non dangereux appartenant à la liste 19.08 de la nomenclature des déchets.

A ce titre, les boues peuvent être admises en ISDND si :

> elles satisfont à la caractérisation de base, et respectent notamment les points suivants :
- plus de 30 % de matière sèche
- somme des PCB inférieure à 50 mg/kg sec

> elles satisfont à la vérification de conformité (test de potentiel polluant)

Ainsi, les boues produites régulièrement dans le cadre d'un même procédé de traitement et dont la traçabilité est pleinement assurée, font l'objet uniquement d'une vérification de conformité annuelle. A l'inverse, les déchets qui ne font pas partie d'un flux bien caractérisé et identifié, feront l'objet d'une caractérisation de base et d'une vérification pour chaque lot. Les flux issus d'installations de regroupement, de mélange de déchets, issus de centres de transfert ou les déchets collectés en mélange se trouvent dans ce cas.

**La caractérisation de base est la première étape de la procédure d'admission en Installation de Stockage des Déchets Non Dangereux (ISDND). Elle consiste à caractériser globalement le déchet en rassemblant toutes les informations destinées à montrer qu'il remplit les critères correspondant à la mise en décharge pour déchets non dangereux.**

**Base de la caractérisation du déchet**

Dans la plupart des cas, les informations à fournir sur le déchet sont les suivantes :

- source et origine,
- informations concernant le processus de production du déchet (pour les boues, description et caractéristiques des traitements des eaux et des boues)
- données concernant sa composition et son comportement à la lixiviation, le cas échéant ;
- apparence (odeur, couleur, apparence physique) ;
- code, en lien avec la nomenclature des déchets (décret du 18 avril 2002).

Voici quelques exemples :
- boues urbaines : 19 08 05
- boues biologiques industrielles sans substances dangereuses : 19 08 12
- boues industrielles issues d'autres traitements sans substances dangereuses : 19 08 14.
- composts déclassés : 19 05 03
- fraction non compostée des déchets municipaux et assimilés (refus de compostage) : 19 05 01

- au besoin, précautions supplémentaires à prendre au niveau de l'installation de stockage.

[...]

En complément de ces informations, un test de potentiel polluant comportant le plus souvent les paramètres suivants est demandé par les exploitants d'ISDND.

| Paramètres intrinsèques | Paramètres sur éluat obtenu après lixiviation selon NF EN 12457-2 (rapport L/S = 10) |
|---|---|
| Matière sèche, carbone organique total, PCB, HAP (16), BTEX (solvants aromatiques), hydrocarbures totaux. | Métaux : Antimoine (Sb), Arsenic (As), Baryum (Ba), Chrome (Cr), Cuivre (Cu), Mercure (Hg), Molybdène (Mo), Nickel (Ni), Plomb (Pb), Sélénium (Se) , Zinc (Zn).<br>Fluorures<br>Indice phénol<br>COT<br>Fraction soluble |

Au LCA, tous ces paramètres sont rassemblés au sein d'un menu analytique : BO_DECH1. Certains exploitants ajoutent des déterminations complémentaires à ces paramètres de base.

## LA VÉRIFICATION DE CONFORMITÉ

La fréquence de la vérification de la conformité ainsi que les paramètres pertinents qui y seront recherchés sont déterminés par l'exploitant du site de stockage sur la base des résultats de la caractérisation de base. Le plus souvent, au moins l'ensemble des paramètres sur éluat est reconduit, ainsi que la matière sèche. Au LCA, ces paramètres sont rassemblés dans un menu analytique : BO_DECH4. Il arrive que le carbone organique total fasse également partie des paramètres retenus pour les contrôles de conformités, notamment pour les boues.

***Rappel : la vérification de la conformité est à réaliser au plus tard un an après la caractérisation de base et à renouveler au moins une fois par an.***

## VALEURS SEUILS RÉGLEMENTAIRES POUR L'ADMISSION EN ISDND

Le 19 décembre 2002, le conseil européen a publié une décision (décision 2003/33/CE) établissant des critères et des procédures d'admission des déchets dans les décharges dans l'Union Européenne. Pour le moment, cette décision n'a pas fait l'objet d'une retranscription dans la réglementation française en ce qui concerne ces valeurs limites d'admission pour les ISDND. En l'attente de cette transposition, ce sont les valeurs seuils fixées dans les arrêtés préfectoraux de chaque site qui font référence. Ces valeurs limites sont généralement fournies par les exploitants de site sur simple demande.
Le texte européen sert toutefois de base de travail pour de nombreux exploitants en France.

Valeurs limites de la décision 2003/33/CE pour la mise en décharge dans l'UE

| PARAMÈTRES INTRINSÈQUES | | Unités | Valeurs limites 2003/33/CE |
|---|---|---|---|
| Siccité (matière sèche) | | % | ≥30 |
| Carbone organique | COT | mg/kg sec | 50 000 |
| pH | | unité pH | ≥6 |
| **ANALYSES SUR ELUAT (Rapport L/S = 10 selon NF EN 12457-2)** | | | |
| Arsenic | As | mg/kg sec | 2 |
| Baryum | Ba | mg/kg sec | 100 |
| Cadmium | Cd | mg/kg sec | 1 |
| Chrome total | Cr | mg/kg sec | 10 |
| Cuivre | Cu | mg/kg sec | 50 |
| Mercure | Hg | mg/kg sec | 0,2 |
| Molybdène | Mo | mg/kg sec | 10 |
| Nickel | Ni | mg/kg sec | 10 |
| Plomb | Pb | mg/kg sec | 10 |
| Antimoine | Sb | mg/kg sec | 0,7 |
| Sélenium | Se | mg/kg sec | 0,5 |
| Zinc | Zn | mg/kg sec | 50 |
| Chlorure | $Cl^-$ | mg/kg sec | 15 000 |
| Fluorure | $F^-$ | mg/kg sec | 150 |
| Sulfate | $SO_4^{--}$ | mg/kg sec | 20 000 |
| Carbone organique | COT | mg/kg sec | 800 |
| Fraction soluble | FS | mg/kg sec | 60 000 |

La satisfaction au test de potentiel polluant est souvent l'étape clé pour l'admission du déchet en ISDND. Les boues peuvent être refusées du fait de résultats non-conformes, notamment au niveau de certains paramètres intrinsèques comme le carbone organique (COT). Toutefois, la décision européenne précise que « si cette valeur est dépassée, une valeur limite plus élevée peut être admise par l'autorité compétente à condition que la valeur limite de 800 mg/kg soit respectée pour le COT sur éluat, à la propre valeur de pH du matériau ou pour un pH compris entre 7,5 et 8 ». D'autres dérogations sont possibles, notamment lorsque la fraction soluble dépasse la valeur limite. Toutes ces dérogations sont indiquées dans l'arrêté préfectoral du site.

Si malgré ces dérogations, les valeurs limites sont dépassées, la boue devra faire l'objet d'un traitement complémentaire pour être admise dans l'ISDND.

# TMB : LE MÉCANO DES TEMPS MODERNES

*Publication du 25 avril 2013*

Nous produisons aujourd'hui deux fois plus de déchets qu'en 1960. Différentes solutions d'élimination ou de traitement ont été mises en œuvre simultanément à cette augmentation des tonnages. Les plus récentes prennent en compte les préoccupations en matière de développement durable et de recyclage matière. Après avoir soutenu l'installation des premiers centres de tri mécano-biologique (TMB) pour le traitement des ordures ménagères, l'ADEME(1) continue de promouvoir le concept dans la mesure où il peut être bien maîtrisé et intégré dans une gestion multi filières. Se basant sur les premiers retours d'expérience (2), l'agence insiste sur les risques et la difficulté de mise en œuvre de ces traitements. Quelles sont ces installations, apparues à la fin des années 90 et leurs particularités ?

## LES TMB : DÉFINITIONS ET ATTENTES

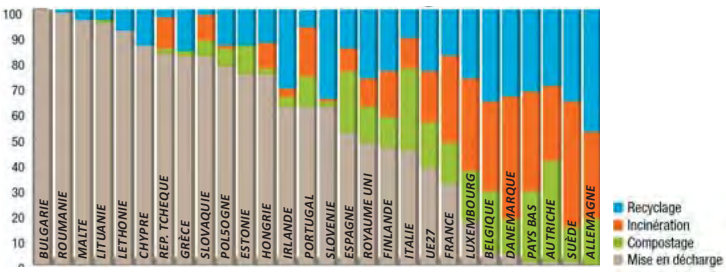
Sous l'impulsion de la directive européenne 1999/31/CE du 26 avril 1999 imposant aux états membres une réduction de la mise en décharge de déchets biodégradables, la Loi Grenelle 1 du 3 août 2009 a fixé les objectifs et les moyens à mettre en œuvre pour la Prévention des Déchets (LOI n°2009-967, Titre III, Chapitre II), déclinés dans le plan national de gestion des déchets (2009-2012). Ce dernier vise par exemple à « développer le recyclage matière et organique afin d'orienter vers ces filières un taux de 35% en 2012 et 45% en 2015 de déchets ménagers et assimilés ».

Les usines de tri mécano-biologique (TMB) apparaissent alors, comme une alternative intéressante pour une meilleure valorisation de certains déchets, comme les ordures ménagères résiduelles (OMR), par rapport aux filières pré existantes d'élimination (mise en décharge, incinération). Une installation de TMB répond à plusieurs attentes, sans nécessiter a priori de changer les habitudes de tri des consommateurs :

- réduire la quantité de déchets ultimes par la séparation de diverses fractions (matériaux, matières fermentescibles...)
- permettre la valorisation agronomique, voire économique, d'un déchet par sa transformation en produit (composts normés) ou par le retour au sol (plan d'épandage)
- produire du biogaz et/ou de la chaleur (valorisation énergétique) Ces procédés de traitement associent des étapes mécaniques et des étapes biologiques :
- Les opérations mécaniques (tris densimétriques, aimants, courants de Foucaud, détection optique et jet d'air...) visent à fractionner les déchets et à isoler certains matériaux valorisables (l'aluminium, le fer, le polyéthylène PET, le polyéthylène haute densité PEHD...), les fractions organiques et les parties incinérables à fort pouvoir calorifique. Selon les centres de traitement, les mécanismes employés ne sont pas identiques et n'interviennent pas au même moment dans la chaîne.
- Les opérations biologiques (compostage, méthanisation) transforment la fraction fermentescible en produits valorisables (compost, biogaz...) ou en produits stabilisés (stockables en centre d'enfouissement).

## DÉVELOPPEMENT DE LA FILIÈRE

Les unités de TMB implantées dans une quinzaine de pays européens permettent de traiter autour de 8,5 millions de tonnes de déchets par an, mais les disparités sont fortes selon les pays : en 2007, l'Allemagne comptait 45 unités récentes contre 5 en France. Cette situation évolue : on recense aujourd'hui une quarantaine de projets de création de sites de TMB en France, ainsi qu'une vingtaine de projets de transformation de sites existants. Les voies privilégiées de valorisation du produit final sont soit la méthanisation avec apport au sol du digestat, soit la production de compost.




## LES PRODUITS DU TMB

Les objectifs de production des TMB peuvent être de différentes natures (3) :

- obtenir un compost, après méthanisation ou non, de qualité conforme à la norme NF U 44-051 des amendements organiques
- éventuellement produire et valoriser du biogaz issu de la méthanisation de la fraction fermentescible des OMR
- recycler et valoriser divers matériaux sous forme de matière : métaux, papiers, PET...
- éventuellement stabiliser la matière organique résiduelle avant mise en décharge par obtention d'une matière stabilisée

Le compost est le seul de tous ces produits à être normalisable. A condition que les critères de la norme NF U 44-051 soient satisfaits, en termes de nature des matières premières, de process et de qualité du produit fini, l'obtention d'un produit « normé » permet au compost de passer du statut règlementaire de « déchet » à celui de « produit ». Les suivis à mettre en place sont plus coûteux dans le premier cas, le déchet devant faire l'objet d'un plan d'épandage ou aller vers d'autres filières de traitement (centre d'enfouissement, incinération...). Les exploitants privilégient donc le plus souvent l'obtention d'un compost « normé ».

## ÉVALUER LA QUALITÉ DU COMPOST

En termes réglementaires, la qualité du compost est définie selon la norme NF U 44-051. Les composts d'OMR issus du TMB relèvent alors de la dénomination « Compost de fermentescibles alimentaires et/ou ménagers » de la norme. Cette dernière définit précisément un ensemble de caractéristiques dont doit disposer un compost afin d'être mis sur le marché (cession à titre gratuit ou vente). Les exigences portent sur des critères d'efficacité agronomique et sur des critères relatifs à l'innocuité : agents pathogènes tels que les œufs d'helminthes viables et les salmonelles, éléments traces métalliques ou métalloïdes, composés traces organiques (HAP) et enfin la présence d'inertes indésirables.

Les inertes, selon la norme NF U 44-051, sont des éléments indésirables tels que le verre, les morceaux métalliques, les films plastiques et PSE (polystyrène expansé) et les autres plastiques.

Ce dernier point est crucial, car il constitue une cause fréquente de non-conformité des composts issus de TMB. L'évaluation de ces paramètres doit se faire selon la norme XP U44-164

La qualité des produits issus de TMB est l'un des points sensibles à maîtriser pour assurer la pérennité de ces filières. Il est néanmoins évident que la maîtrise du process industriel, complexe à mettre en œuvre car nécessitant des connaissances techniques à plusieurs étapes (tri, compostage, méthanisation...), est capitale.
Les laboratoires LCA et Celesta-Lab proposent l'ensemble des analyses réglementaires pour le contrôle qualité des produits finis issus du TMB. Ils peuvent aussi vous proposer des indicateurs pour piloter vos installations en cours de process (inertes) ou sur les matières entrantes (détermination de la matière organique non synthétique MONS par exemple).

*(1) Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie*
*(2) ADEME, avis sur les TMB ,08 Mars 2012*
*(3) Vade-mecum des traitements mécano-biologiques des déchets ménagers, ASTEE, 2012*

# DRAGAGE, ET APRÈS ?

*Publié le 15 mai 2014*

Le territoire français compte 525 000 km de cours d'eau qui transportent chaque année, en moyenne 6 millions de m3 de sédiments. Les opérations de curage et de dragage des cours d'eau et des voies navigables sont indispensables pour assurer le transfert des masses d'eau, limitant ainsi les risques d'inondation, et pour maintenir une profondeur suffisante pour les voies navigables. Les sédiments issus du dragage doivent être, de préférence, réintroduits dans le cours d'eau afin de maintenir un bilan sédimentaire équilibré. Toutefois, si la qualité des sédiments, l'environnement biologique du cours d'eau, son régime hydraulique et les facteurs technico-économiques ne sont pas favorables à une opération de clapage (1) , les matériaux doivent alors être extraits et dirigés vers des filières adaptées. La valorisation agricole est l'une d'elles. Pourtant, alors que ces sédiments présentent souvent de réels intérêts agronomiques pour les sols, leur valorisation sur les terres agricoles est (trop) peu répandue. L'AgroReporter fait le point sur cette pratique, ses atouts et ses contraintes.

## Cadre réglementaire

La directive n°2008/98/CE du 19/11/08 relative aux déchets, indique que les sédiments hors d'eau sont considérés comme des déchets. Selon la définition de la loi n°75-633 (1975) modifiée par la loi n° 92-646 (1992) intégrée dans le Code de l'Environnement, les sédiments de dragage sont considérés comme des déchets en tant que produit de l'activité d'entretien d'un cours d'eau ou d'un canal.
L'épandage agricole de sédiments ne bénéficie à ce jour d'aucune réglementation spécifique. L'absence de ce cadre législatif dédié aboutit fréquemment à des pratiques empiriques de la valorisation des sédiments en agriculture. L'article 9 de l'arrêté du 30 Mai 2008 fixant les prescriptions générales applicables aux opérations d'entretien de cours d'eau ou canaux soumis à autorisation ou à déclaration, mentionne la possibilité d'effectuer « un épandage agricole, sous réserve de l'accord des propriétaires des parcelles et du respect des prescriptions techniques applicables aux épandages de boues sur les sols agricoles fixées parl'arrêté du 8 janvier 1998 ». De même, l'article 4.a) de la circulaire du 4 Juillet 2008 relative à la procédure concernant la gestion des sédiments lors de travaux ou d'opérations impliquant des dragages ou curages maritimes et fluviaux, précise que l'épandage des sédiments de dragage sur une parcelle agricole ne peut se réaliser que pour des sédiments non dangereux.

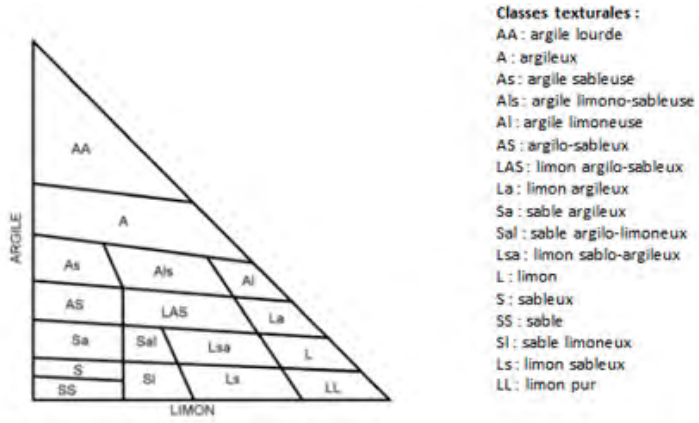
En résumé, les épandages de sédiments non dangereux sont donc possibles sous réserve de respecter les prescriptions de l'arrêté du 8 janvier 1998. Outre le respect des valeurs limites en concentration de certains contaminants permettant de s'assurer de l'innocuité des sédiments, et le respect des flux de ces mêmes contaminants, leur intérêt agronomique doit donc être démontré.

Il est intéressant de souligner que le règlement relatif à la production biologique autorise depuis peu (voir le règlement d'exécution (UE) N°354/2014 du 08/04/2014), les sédiments anaérobies riches en matière organique provenant de masses d'eau douce comme amendement du sol. Dans ce cas, les valeurs limites de concentrations en éléments traces métalliques sont inférieures à celles de l'arrêté du 8 janvier 1998.

## Caractérisation agronomique des sédiments

L'intérêt agronomique des sédiments est à aborder sous deux angles :

- Intérêt amendant : Un sol agricole est considéré comme fertile s'il possède des éléments fertilisants mais surtout une texture et une structure équilibrée. Pour restructurer un sol à faible teneur en colloïdes (argiles), l'apport de sédiments stables, favorisant la résistance physique peut présenter un réel intérêt. La qualité de cette fraction minérale se base sur une analyse granulométrique. Elle permet d'apprécier les proportions d'argiles, de limons et de sables et de déterminer la texture du sédiment, et ses propriétés physiques.




*Exemple de triangle des textures (Triangle du GEPPA à 17 classes, 1963)*
*Source : d'après Richer de Forges et al, 2008*

Combinée à la détermination de la teneur en matière organique et en bases échangeables (calcium et sodium notamment), la stabilité structurale du sédiment peut être alors être qualifiée. Des sédiments issus d'un milieu saumâtre peuvent en effet présenter des concentrations importantes en sodium, susceptibles de déstabiliser leur structure, en limitant la floculation des colloïdes minéraux (dispersion des argiles).

La proportion de matière organique dans la matière sèche des sédiments varie entre 90%, dans le cas de la tourbe, et moins de 2% pour les sables de rivière. La composition de cette matière organique est généralement identique d'un type de sédiment à un autre. En général, la proportion de matière organique est de l'ordre de 2 à 10% pour les sédiments des cours d' "eaux vives" et elle est constituée à 60% de composés humiques.
(...)

(...)

- Intérêt fertilisant : cet axe s'intéresse à l'aptitude des sédiments à apporter des éléments fertilisants disponibles à destination des cultures. Contrairement à une boue d'épuration, un sédiment présente une fraction minérale importante, qui l'apparente davantage à de la terre qu'à une boue. La caractérisation de la valeur fertilisante du sédiment est mesurée au laboratoire par l'analyse des paramètres agronomiques classiquement réalisés sur les boues, en contenu total, utilement complétés par des caractérisation appartenant au domaine des terres (granulométrie 5 fractions, phosphore assimilable, potassium échangeable, matière organique libre/liée, …). D'après les analyses réalisées au laboratoire LCA, les teneurs en phosphore total et en potassium total des sédiments sont souvent assez élevées, pouvant être proches de celle d'un fumier ou d'un compost végétal. L'analyse des éléments assimilables ou échangeables permet de relativiser cette richesse : les quantités de phosphore Joret-Hébert et de potassium échangeable sont comparables à celles mesurées dans les sols agricoles. Les teneurs en azote, et par conséquent le rapport C/N, sont très variables d'un sédiment à l'autre. Les formes minérales de l'azote (principalement la forme ammoniacale du fait des conditions anoxiques des sédiments en eaux) peuvent représenter des apports élevés d'azote minéral par les sédiments.

| | pH | MO | Azote | P2O5 | K2O | CaO |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Minimum | 4.7 | 13.1 | 0.1 | 0.15 | 0.25 | 3.08 |
| Maximum | 10.5 | 726.6 | 30.4 | 8.8 | 8.9 | 556.0 |
| Ecart type | 0.86 | 84.4 | 3.73 | 1.17 | 2.10 | 154.45 |
| Moyenne | 8.1 | 66.4 | 2.91 | 1.77 | 3.20 | 153.4 |

Unité : expression en contenu total et en g/kg de matière sèche (MO : matière organique par perte au feu).

*Tableau 1 : composition des sédiments d'eau douce (Source : LCA, analyse sur une centaine d'échantillons)*

Le Tableau 1 illustre les différences importantes rencontrées au sein des sédiments. Celles-ci sont expliquées par la genèse de ces matériaux, la géologie et l'environnement global du milieu hydrique. Par exemple, le calcium et le pH seront plus élevés dans les sédiments de régions calcaires, et la matière organique sera plus présente sous une ripisylve (2) . De même, la granulométrie du sédiment va être en relation avec la géologie et l'hydrologie.

***Les sédiments sont des intrants potentiellement très intéressants en agriculture. Leur intérêt agronomique peut être aisément mesuré en laboratoire, offrant ainsi aux acteurs de la filière un réel outil d'appréciation. Toutefois le contexte réglementaire ne facilite pas le développement de cette filière. En étant assimilés à des boues d'épuration, les seuils des flux maximum autorisés (notamment en matière sèche) limitent le plus souvent la quantité de sédiments à épandre à des doses sans effet significatif sur les propriétés physique des sols. L'usage à des fins de restructuration ou de reconstitution de sols par l'apport massif de sédiments s'en trouve limité. Les sédiments et les boues urbaines sont des matériaux très différents de par leur texture et leur composition mais également de par leur origine. La mise en place d'une réglementation spécifique serait probablement nécessaire au développement de cette filière de valorisation.***

***Sources :***

***- INRA – courrier de l'environnement - Le curage des sédiments des cours d'eau par Grégoire Schneider***
***- CETE – CETMEF : Valorisation agronomique des sédiments de dragage de canaux : première expérimentation agricole en Saône - et - Loire (71) - Laurent Cantégrit, Sylvie Nouvion – Dupray – 2011***
***- Dragage d'entretien des voies navigables – Aide à l'élaboration et au suivi d'un plan de gestion pluriannuel – Cetmef – mai 2011***
***- INRA - La valorisation agronomique des sédiments marins de la Rance – Jeanne Bourret - Courrier de l'environnement de l'INRA n°31, août 1997***

*(1) Le clapage et la remise en suspension consistent à remblayer des fosses ou des zones présentant une forte érosion dans le cours d'eau faisant l'objet d'un dragage. Ces pratiques permettent de garantir l'équilibre sédimentaire du cours d'eau. Elles sont soumises à autorisation ou déclaration au titre de la rubrique 2.2.3.0 sur les rejets dans les eaux de surface et doit être prévue dans le plan de gestion. Ce procédé d'élimination est prioritaire selon l'arrêté du 30 mai 2008.*

*(2) Ripisylve : formations végétales qui se développent sur les bords des cours d'eau ou des plans d'eau situés dans la zone frontière entre l'eau et la terre (écotones). Elles sont constituées de peuplements particuliers en raison de la présence d'eau sur des périodes plus ou moins longues : saules, aulnes, frênes en bordure, érables et ormes en hauteur, chênes pédonculés et charmes sur le haut des berges.*

# DÉCHETS : CONSEILS DE CLASSE ET D'ORIENTATION

*Publié le 24 octobre 2013*

Même si nous sommes de plus en plus conscients des possibilités qu'offre leur recyclage, les déchets continuent de nous interpeller, par peur ou méconnaissance. Il faut aussi admettre que la réglementation applicable aux déchets est assez peu accessible aux non-spécialistes.
Il est utile de rappeler qu'un déchet possède sa propre définition réglementaire dans le code de l'environnement. La notion de déchet est plus complexe qu'il n'y paraît, car bien évidemment, selon sa provenance et son niveau de dangerosité, son évacuation et/ou traitement ne seront pas les mêmes. Une nomenclature nationale permet de classer les déchets par catégories avec, pour chacune, des dispositions bien définies. Des déchets municipaux aux déchets dangereux diffus, en passant par les déchets agricoles, ou les déchets d'entreprises ou d'activités de soins, la liste est longue !
Cet article de l'AgroReporter explique la nomenclature des déchets et présente leurs voies possibles d'orientation. Il s'intéresse plus particulièrement aux déchets inertes et aux déchets non dangereux.

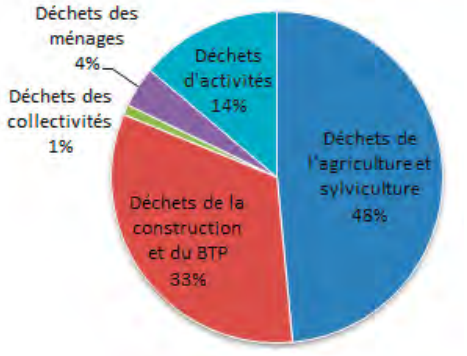
## QUELQUES CHIFFRES CLES SUR LA PRODUCTION DES DECHETS EN FRANCE

En millions de tonnes

| Déchets des collectivités | Déchets des ménages | | Déchets d'activités | | | Déchets de l'agriculture et sylviculture | Déchets de la construction et du BTP |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 5,3 | 31,9 | | 106 | | | 374 | 253 |
| Voirie et marchés 3,0<br>Boues de stations d'épuration (STEP) 1,3<br>Déchets verts 1,0 | Déchèteries et encombrants (1) 12,5<br>Déchets dangereux 0,1 | Ordures ménagères strictes (2) 19,3 | Déchets non dangereux (3) 98<br>Dont collectés en ordures ménagères 4,8 | Dont collectes privées 93,2 | Déchets dangereux 8 | | |
| Déchets municipaux 42 | | | | | | | |
| | Déchets ménagers et assimilés 37 | | | | | | |
| | | Ordures ménagères et assimilées (OMA) 26 | | | | | |

(1) Y compris des déchets d'activités économiques
(2) En provenance des seuls ménages. Comprend les ordures ménagères résiduelles et les produits des collectes séparées.
(3) Y compris déchets organiques des IAA (44 Mt)

*Production de déchets en France (source : ADEME – DECHETS édition 2012). Données issues d'enquêtes, d'études ou estimations produites entre 1995 et 2010.*


Déchets des ménages 4%
Déchets d'activités 14%
Déchets des collectivités 1%
Déchets de l'agriculture et sylviculture 48%
Déchets de la construction et du BTP 33%

*<-Part des différents secteurs dans la production des déchets en France (source : ADEME – 2012)*

## N'EST PAS DECHET QUI VEUT

Réglementairement parlant, un déchet est défini à l'article L541-1 du Code de l'Environnement, comme étant « tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, toute substance, matériau, produit ou plus généralement tout bien meuble abandonné ou que son détenteur destine à l'abandon ». Ainsi, l'inscription sur la liste ne signifie pas que la matière ou l'objet en question soit un déchet dans tous les cas : c'est sa « destination finale » qui détermine le produit comme étant un déchet.
Les dispositions relatives à la classification des déchets se trouvent aux articles R. 541-7 à R. 541-11 et aux annexes à l'article R. 541-8 du code de l'environnement. Ces dispositions sont issues du décret n° 2002-540 du 18 avril 2002 (publié au JO du 20 avril 2002), abrogé et codifié dans le code de l'environnement par le décret du 12 octobre 2007 (JO du 16 octobre 2007).
Il s'agit d'une liste unique des déchets, qui permet d'affecter un code à 6 chiffres à un déchet en fonction de sa source de production et de sa nature. Outre la nomenclature des déchets, ceux-ci sont habituellement différenciés en fonction de leur provenance (déchets ménagers, des collectivités locales ou industriels) et de leur nature (dangereux ou non dangereux). Les déchets sont classés « dangereux » au titre de la réglementation déchet s'ils présentent une ou plusieurs propriétés définies par le décret n° 2002-540 (propriétés listées à l'annexe I à l'article R541-8).

## INERTE, BANAL OU DANGEREUX ?

Avant toute chose, c'est bien la première question à se poser sur un déchet afin de le gérer conformément à la réglementation.
On distingue donc trois classes principales de déchets :

- Les déchets inertes : ce sont les déchets les plus stables. Stockés en centre d'enfouissement, ils ne subissent aucune modification physique, chimique ou biologique importante.
- Les déchets non dangereux (ex- « déchets banals ») : ce sont les déchets des entreprises qui ne sont ni inertes, ni dangereux.
- Les déchets dangereux (ou spéciaux) : ce sont les déchets qui présentent une ou plusieurs propriétés de danger vis-à-vis de l'environnement. Ils sont identifiés par un astérisque dans la nomenclature déchets de l'article R 541-8 du code de l'environnement.

(...)

(...)

Source : ADEME – DECHETS 2012 : Les obligations réglementaires des entreprises concernant leurs déchets

Ces trois classes impliquent des obligations réglementaires, des orientations spécifiques et des tarifs d'élimination croissants :

Les tarifs d'élimination vont varier de 3-5 € HT/t pour les déchets inertes, à 50-100 € HT/t pour les déchets non dangereux et atteindre des tarifs supérieurs à 500 €/t en installations de stockage de déchets dangereux. Il s'agit d'ordres de grandeurs car les coûts varient en fonction de la nature du déchet et d'éventuels surcoûts de stabilisation (traitements aux liants hydrauliques).

## CAS DES MELANGES DE DECHETS

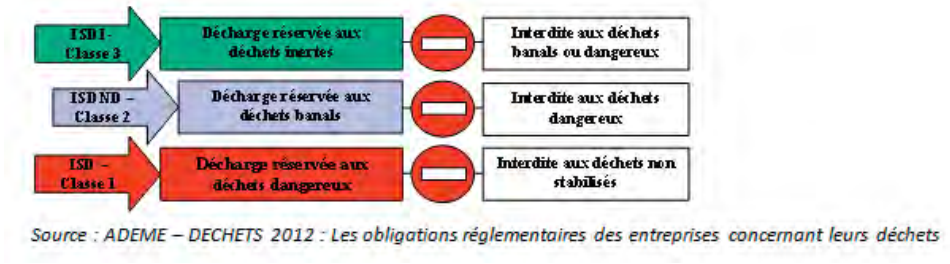
**Cette hiérarchie conditionne la classe finale à laquelle appartiendra un mélange entre deux catégories de déchets :**

- Un mélange déchet banal + déchet dangereux est un déchet dangereux ;
- Un mélange déchet inerte + déchet banal est un déchet banal.

Par exemple, une benne de gravats de démolition qui contient des caisses cartons et des films plastiques est une benne de déchets banals. Des déchets cartons souillés par de l'huile de vidange sont classés parmi les déchets dangereux. Ainsi, compte-tenu de la hiérarchie des obligations réglementaires et des tarifs d'élimination (dangereux > banals > inertes), il est préférable de stocker séparément les 3 catégories de déchets.

**On distingue trois types d'installation de stockage des déchets, en fonction des catégories acceptées :**

- Installation de Stockage de Déchets Inertes (ISDI)
- Installation de Stockage de Déchets Non Dangereux (ISDND)
- Installation de Stockage de Déchets Dangereux (ISD)


ISDI - Classe 3
Décharge réservée aux déchets inertes
Interdite aux déchets banals ou dangereux
ISDND – Classe 2
Décharge réservée aux déchets banals
Interdite aux déchets dangereux
ISD – Classe 1
Décharge réservée aux déchets dangereux
Interdite aux déchets non stabilisés

Source : ADEME – DECHETS 2012 : Les obligations réglementaires des entreprises concernant leurs déchets

## DECHETS INERTES

Les déchets inertes sont définis par l'article 2 de la Directive 99/31 relative à la mise en décharge des déchets. Ce sont des déchets qui, pendant leur stockage, ne subissent aucune modification physique, chimique ou biologique importante. Le déchet inerte ne se décompose pas, ne brûle pas, ne produit pas de réaction physique ou chimique, n'est pas biodégradable et ne détériore pas les autres matières avec lesquelles il entre en contact, d'une manière susceptible d'entraîner des atteintes à l'environnement ou à la santé humaine. Cette définition, applicable dans tous les états membres européens, a été intégrée à l'article R. 541-8 du code de l'environnement.
Ils sont principalement issus du BTP (pavés, sables, gravats, tuiles, béton, ciment, carrelage...) mais peuvent aussi provenir d'industries diverses.
Dans la plupart des pays, depuis les années 1990, le droit de l'environnement encourage ou permet la réutilisation et le recyclage de ces déchets autant que possible. Par ailleurs, la législation oblige maintenant à valoriser au maximum les déchets avant de les éliminer (Article L. 541-1 du code de l'environnement). Mais, les conditions techniques et économiques du moment (absence de marché, faible valeur des matières « nobles » naturelles rendant prohibitive l'utilisation de certains matériaux recyclés, etc...) font que parfois, la réutilisation ou le recyclage de certains déchets n'est pas rentable. Ils sont alors éliminés dans des installations appropriées, dites en France ISDI (Installations de Stockage de Déchets Inertes), auparavant appelées « décharges de classe 3 ».

**Le saviez-vous ?**

Les déchets industriels, issus du BTP, issus de l'assainissement, peuvent désormais être valorisés en technique routière. Des travaux ont été menés par le Service d'études sur les transports, les routes et leurs aménagements (SETRA) permettant l'édition d'un Guide Pratique pour la valorisation TP des déchets.

## DECHETS NON DANGEREUX

Comme précisé dans la première partie de cet article, les déchets non dangereux sont les déchets qui ne présentent aucune des caractéristiques relatives à la « dangerosité » mentionnées dans l'annexe I de l'article R 541-8 du Code de l'environnement (toxique, explosif, corrosif, etc.). Anciennement appelés « déchets banals » ou « déchets industriels banals », ils sont générés par les entreprises, les commerçants, les artisans et les ménages. Par leur nature, ces déchets sont assimilables aux déchets ménagers et ont des modes de traitements similaires.
(...)

(...)

## LES INSTALLATIONS DE STOCKAGE DE DECHETS, OU ISD

Inertes ou non dangereux, la classification du déchet est une première étape pour l'éliminer conformément à la réglementation. Il faut aussi s'assurer qu'il satisfait les critères d'admission dans le centre de stockage dédié :

- ISDI : installation de stockage de déchets inertes (Arrêté du 28/10/2010)
- ISDND : installation de stockage de déchets non dangereux (Arrêté du 9/09/1997)

La décision du Conseil Européen du 19 décembre 2002 fixe les critères pour l'admission en ISD, selon les classes de déchets. La réglementation française, qui est une application dans le droit français de la décision de l'Union Européenne, ajoute quelques conditions supplémentaires, notamment la vérification d'une siccité supérieure à 30 %. Selon l'article 7 de l'arrêté du 28/10/2010, sont aussi interdits :

- Les déchets liquides
- les déchets dont la température est supérieure à 60 °C ;
- les déchets non pelletables ;
- les déchets pulvérulents, à l'exception de ceux préalablement conditionnés ou traités en vue de prévenir une dispersion sous l'effet du vent.

Le seuil de 30% de siccité est aussi la valeur minimale à partir de laquelle la norme de lixiviation NF EN 12457-2, demandée pour la vérification de la conformité des déchets, est applicable. La vérification de la teneur en matière sèche est donc la première étape analytique avant de pouvoir contrôler les autres paramètres exigés par la réglementation, présentés ci-dessous.

**CRITERES D'ADMISSION DES DECHETS EN CENTRE DE STOCKAGE SELON LA DECISION DU CONSEIL EUROPEEN DU 19 DECEMBRE 2002**

| ANALYSES SUR PRODUIT PRUT | Unités | ISD Classe III (Arrêté du 28/10/2010) | ISDND Classe II (Arrêté du 09/09/97) | CSD Classe I (Arrêté du 30/12/02) |
|---|---|---|---|---|
| Matière sèche | % | > 30 % | > 30 % | > 30 % |
| Carbone organique | mg/kg sur sec | 30 000 | 50 000 (1) | 60 000 |
| pH | | | ≥ 6 (1) | |
| Perte au feu | mg/kg sur sec | | | 100000 |
| BTEX | mg/kg sur sec | 6 | | |
| PCB | mg/kg sur sec | 1 | | |
| Hydrocarbures | mg/kg sur sec | 500 | | |
| HAP | mg/kg sur sec | 50 | | |

(1) : uniquement pour les catégories de déchets dangereux, admissibles dans les décharges pour déchets non dangereux

| ANALYSES SUR ELUAT (NF EN 12457-2) | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Arsenic | mg/kg sur sec | 0,5 | 2 | 25 |
| Baryum | mg/kg sur sec | 20 | 100 | 300 |
| Cadmium | mg/kg sur sec | 0,04 | 1 | 5 |
| Chrome total | mg/kg sur sec | 0,5 | 10 | 70 |
| Cuivre | mg/kg sur sec | 2 | 50 | 100 |
| Mercure | mg/kg sur sec | 0,01 | 0,2 | 2 |
| Molybdène | mg/kg sur sec | 0,5 | 10 | 30 |
| Nickel | mg/kg sur sec | 0,4 | 10 | 40 |
| Plomb | mg/kg sur sec | 0,5 | 10 | 50 |
| Antimoine | mg/kg sur sec | 0,06 | 0,7 | 5 |
| Sélénium | mg/kg sur sec | 0,1 | 0,5 | 7 |
| Zinc | mg/kg sur sec | 4 | 50 | 200 |
| Chlorures | mg/kg sur sec | 800 (2) | 15 000 | 25 000 |
| Fluorures | mg/kg sur sec | 10 | 150 | 500 |
| Sulfates | mg/kg sur sec | 1000 (2) | 20 000 | 50 000 |
| Indice phénol | mg/kg sur sec | 1 | | |
| Carbone organique total sur éluat | mg/kg sur sec | 500 | 800 | 1 000 |
| Fraction soluble | mg/kg sur sec | 4000 (2) | 60 000 | 100 000 |

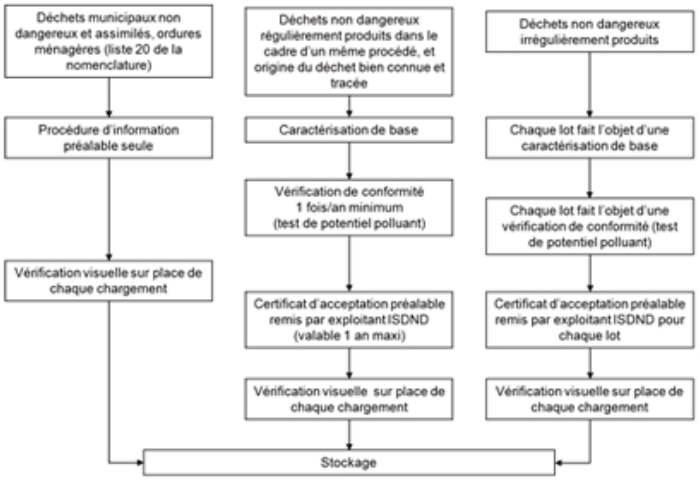
(2) Si le déchet ne respecte pas au moins une des valeurs fixées pour le chlorure, le sulfate ou la fraction soluble, il peut être encore jugé conforme aux critères d'admission s'il respecte soit les valeurs associées au chlorure et au sulfate, soit celle associée à la fraction soluble.

*Critères d'admission des déchets en centre de stockage, selon la décision du CE du 19/12/2002*

Dans le cadre de déchets industriels inertes, on privilégie l'entrée en ISDI, car il s'agit de la filière préférentielle et de la solution la moins coûteuse. Lorsque tous les critères de la liste ne sont pas vérifiés, on examine la possibilité d'une acception en ISDND (classe II), ou en dernier recours en ISDD (centre de stockage pour déchets dangereux – hors déchets radioactifs).
Pour les déchets municipaux (non dangereux) : si les critères d'acceptation en ISDND ne sont pas satisfaits, ils peuvent alors être orientés en ISDD, sous réserve que les seuils de cette dernière classe soient validés.
En cas de dépassement des seuils, et donc d'impossibilité d'évacuer les déchets en l'état, une étape de lavage ou de pré-traitement peut s'avérer nécessaire et parfois suffisante pour les rendre acceptables en centre de stockage.

Toutefois, comme expliqué plus haut, il ne suffit pas simplement de respecter les seuils fixés par les arrêtés pour qu'un déchet soit accepté en ISD. En outre, d'autres informations, telles que sa nature, son origine, le process de production, sont exigées. Le test de potentiel polluant n'est qu'une étape dans la procédure d'acceptation des déchets

**Procédures d'admission de déchets sur un ISDND**


Déchets municipaux non dangereux et assimilés, ordures ménagères (liste 20 de la nomenclature)
Déchets non dangereux régulièrement produits dans le cadre d'un même procédé, et origine du déchet bien connue et tracée
Déchets non dangereux irrégulièrement produits
Procédure d'information préalable seule
Caractérisation de base
Chaque lot fait l'objet d'une caractérisation de base
Vérification de conformité 1 fois/an minimum (test de potentiel polluant)
Chaque lot fait l'objet d'une vérification de conformité (test de potentiel polluant)
Vérification visuelle sur place de chaque chargement
Certificat d'acceptation préalable remis par exploitant ISDND (valable 1 an maxi)
Certificat d'acceptation préalable remis par exploitant ISDND pour chaque lot
Vérification visuelle sur place de chaque chargement
Vérification visuelle sur place de chaque chargement
Stockage

# QUALITE SANITAIRE

L'AGRO reporter

EDITION COMPLETE

# LE MICROBE N'EST RIEN. LE TERRAIN EST TOUT (Louis Pasteur)

*Publié le 22 octobre 2010*

Le service de microbiologie du laboratoire LCA est accrédité par le Cofrac (COmité FRançais d'ACcréditation) depuis 2008. A ce jour, seulement 2 laboratoires en France sont accrédités sur ce programme et le LCA est le seul laboratoire privé en France accrédité pour la microbiologie des matières fertilisantes et supports de cultures.

L'accréditation atteste de la compétence du personnel et de la maîtrise des différentes normes permettant de réaliser les analyses microbiologiques.

Dans le cadre de notre accréditation, nous sommes tenus de traiter vos échantillons de matières fertilisantes et supports de cultures avec toutes les exigences qu'impose une analyse microbiologique. En effet, la stérilité du flaconnage ainsi que la durée et la réfrigération du transport à notre laboratoire sont autant de points cruciaux pour la fiabilité de vos résultats trop souvent négligés par certains laboratoires..

Le choix d'un laboratoire accrédité pour vos analyses vous assure des résultats fiables, traités avec impartialité par du personnel dont la formation et le maintien des acquis est contrôlée tous les ans lors des différents audits Cofrac.

La participation de Eric Ory, responsable de ce service, à un groupe d'experts à l'Afnor permet d'anticiper les éventuelles évolutions normatives et contribue à faire évoluer cette activité en travaillant par exemple sur de nouvelles méthodes plus adaptées à vos matrices.

# LES BACTÉRIES NOUS PARLENT…

*Publié le 9 juin 2011*

La crise sanitaire qui touche actuellement l'Allemagne soulève un grand nombre de questions sur l'innocuité des denrées alimentaires et, à travers elles, sur les produits organiques utilisés pour les produire.

Même si la bactérie incriminée, Escherichia coli entérohémorragique, est une bactérie rare et ne fait pas partie des bactéries recherchées en routine, nous pouvons constater que les germes d'origines fécales ont de nombreux vecteurs de contaminations comme les produits organiques, l'eau, le végétal lui-même.

La France a heureusement fait le choix, depuis plusieurs années, d'encadrer la qualité sanitaire de certaines matières organiques épandues en agriculture. Selon la nature du produit et son utilisation future, les analyses microbiologiques sont dictées par un cahier des charges qui peut être normatif (NF U 44-095, NF U 44-051…) ou interne, propre au demandeur. Chaque cahier des charges fixe des valeurs limites à ne pas dépasser pour répondre à cette conformité.

L' unité de microbiologie du LCA est accréditée par le Cofrac pour le Programme 108 « Analyses des matières fertilisantes et supports de culture». Nos microbiologistes y effectuent tous les jours les analyses de contrôle réglementaires de boues et de produits organiques normalisés. D'une manière générale, l'analyse comporte la recherche ou le dénombrement de deux catégories de microorganismes :

- les germes indicateurs de traitement,
- les germes pathogènes pour l'Homme.

Ainsi, l'analyse permet de garantir une certaine innocuité du produit pour l'utilisateur, en même temps qu'elle apporte des informations utiles au suivi de process pour le fabricant / producteur.

## GERMES INDICATEURS DE TRAITEMENT

Les germes indicateurs de traitement sont des traceurs fécaux. Les trois germes les plus utilisés sont Escherichia coli, Entérocoques et Clostridium perfringens. Ces trois bactéries sont d'origines fécales humaine et/ou animale. Derrière ces noms bien connus des spécialistes se cachent des germes très communs chez l'Homme et l'animal, et le plus souvent inoffensifs, qui se retrouvent naturellement dans les matières organiques comme les fumiers, matières végétales, boues… Certains procédés comme le compostage, le chaulage ou le lagunage, permettent de réduire la contamination microbienne. En effet ces germes sont sensibles à des facteurs environnementaux tels que la température, la dessiccation, les variations de pH…

Ainsi, quand les résultats trouvés sont supérieurs aux valeurs limites du cahier des charges, deux hypothèses sont à envisager :

> soit le process de traitement est défectueux. Dans le cas du compostage, quatre paramètres influencent largement l'efficacité du traitement d'un point de vue microbiologique :

- -la montée en température,
- -le maintien dans le temps d'une température élevée,
- -le retournement (qui va permettre l'aération et l'homogénéisation de la température),
- -l'humidité.

> soit la charge microbiologique des entrants est très importante.
Les résultats des analyses peuvent aider à trouver des pistes d'amélioration.

## ESCHERICHIA COLI, ENTÉROCOQUES ET CLOSTRIDIUM PERFRINGENS NOUS PARLENT…

**Escherichia coli et Entérocoques** sont des germes aérobies[1][1] pour le premier et aéro-anaérobie[1][2] facultatif pour le deuxième. La présence de ces germes en quantité importante montre que les conditions d'aérobiose (présence d'oxygène) sont bonnes. On peut alors supposer que les retournements ont été efficaces. Il faut donc se pencher sur un problème de montée en température ou de maintien de celle-ci.

**Clostridium perfringen**s est un germe anaérobie strict, c'est-à-dire qu'il est tué en présence d'oxygène. Un résultat d'analyse montrant une non conformité uniquement pour ce germe traduit un manque d'aération de l'échantillon. La cause probable à envisager peut donc être un déficit de retournement de l'andain qui aurait engendré un tassement de celui-ci et créé des conditions d'anaérobiose. Ces conditions sont alors favorables au développement des Clostridium perfringens et inhibent le développement des autres germes.
Quels que soient les germes cités, l'humidité favorisera toujours la croissance bactérienne.
Plus l'échantillon sera sec, plus l'effet de la température sera rapide.

## … LAISSONS LES S'EXPRIMER

L'interprétation des résultats peut donc être valorisée bien au-delà du simple contrôle de conformité. « La microbiologie s'intéresse à des organismes vivants », c'est pourquoi elle peut être un outil précieux d'amélioration ou de pilotage du process de compostage. Mais la discipline est exigeante et elle nécessite un soin particulier dans le traitement des échantillons, dès l'échantillonnage de ceux-ci sur les lieux du prélèvement. Ainsi, la stérilité du flaconnage ainsi que la durée et la réfrigération du transport à notre laboratoire sont autant de points cruciaux pour la fiabilité de vos résultats. L'interprétation des résultats n'est réalisable que lorsque l'échantillon parvient au laboratoire dans un délai maximal de 48 heures après son prélèvement.

*[1] Aérobie : Se dit de micro-organismes qui se multiplient en présence d'oxygène (Dictionnaire Larousse)*
*[2] Anaérobie : Se dit de micro-organismes qui se développent uniquement en l'absence d'oxygène (Dictionnaire Larousse).*

# LES BACTÉRIES DANS LE PETRI

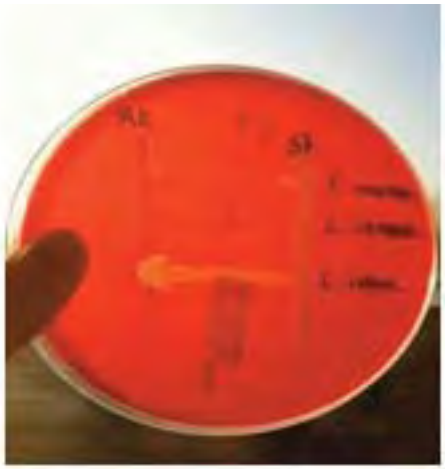
*Publication du 20 décembre 2012*

Dans la grande famille des bactéries, après avoir traité des germes indicateurs de traitement dans l'AgroReporter « Les bactéries nous parlent… » du 9 juin 2011, intéressons-nous à deux pathogènes humains ou ubiquistes, régulièrement recherchés sur nos matrices. Les protagonistes de ce premier épisode sur les agents pathogènes sont Salmonella et Listeria. Un prochain article développera le cas des helminthes.

## SALMONELLA

Le premier, la Salmonella, est une entérobactérie bien connue, responsable des salmonelloses. Ces bactéries se retrouvent dans le tube digestif de l'homme et de nombreux animaux. Les Salmonella sont éliminées par les selles et se retrouvent dans le milieu extérieur (eaux usées, boues …). La contamination se fait alors par voie orale. Au laboratoire, la recherche de ce pathogène en suivant la norme NF EN ISO 6579 (demandée par les différents cahiers des charges) s'avère longue et minutieuse. Le principe consiste en un enrichissement de l'échantillon à analyser afin de multiplier les germes avant de les isoler sur des milieux de cultures spécifiques. Nous utilisons notamment un milieu de culture chromogène, c'est-à-dire qui cible une activité enzymatique de la bactérie. Cette option choisie par le laboratoire permet une plus grande fiabilité dans le choix des colonies suspectes. Car l'analyse ne s'arrête pas là ! Si des colonies sont repérées, nous parlons de présomption de présence de Salmonella.

Ces colonies doivent être confirmées. Cette confirmation passe par deux phases. Une confirmation biochimique qui consiste en une suite de différents tests biochimiques, réunis au laboratoire sur des galeries miniaturisées. Une confirmation sérologique qui consiste en la recherche de certains antigènes spécifiques aux Salmonella. C'est seulement à l'issue de ces deux confirmations que nous pouvons nous prononcer : la présence de Salmonella est déclarée à la seule condition que les deux confirmations biochimique ET sérologique soient positives.



*Exemple de test de Camp*

## LISTERIA

Le deuxième, la Listeria monocytogenes, est responsable des listérioses. Les tableaux cliniques de cette maladie sont variés. Cette bactérie est ubiquitaire, présente chez les hommes, les animaux et dans l'environnement. On la retrouve notamment dans le sol, les eaux usées, les ensilages. Ce sont les fèces des animaux et de l'homme qui enrichissent régulièrement le milieu extérieur. Les Listeria sont des germes résistants et peu exigeants. La plage de température de croissance est de 1°C à 45°C environ. Lors des process de compostage, les températures supérieures à 60°C ont le même effet destructeur sur les Listeria que sur les autres bactéries.

Au laboratoire, la recherche de ce germe pathogène en suivant la norme NF EN ISO 11290-1/A1 suit un peu le même principe que la recherche de Salmonella. En effet, on retrouve le même principe d'enrichissement avec des bouillons de culture sélectifs avant des isolements sur des milieux de cultures spécifiques. Nous utilisons également pour cette recherche un milieu d'isolement chromogène. La confirmation est différente de celle des Salmonella mais tout aussi longue et minutieuse. Nous réalisons une confirmation biochimique basée sur la dégradation de certains glucides. L'autre confirmation importante s'appelle le test de CAMP. Il s'agit d'observer l'interaction de la bactérie présumée être une Listeria monocytogenes avec deux autres bactéries qui sont Staphylococcus aureus et Rhodococcus equi, le tout ensemencé sur une gélose au sang. En effet, l'interaction ou la non interaction avec l'un ou l'autre germe, ou les deux, va nous permettre d'identifier l'espèce de Listeria. La Listeria monocytogenes aura une interaction avec le Staphylocoque aureus en créant une hémolyse visible sur la gélose.

Il n'y a pas d'interaction avec le Rhodococcus equi. Des souches témoin de différentes espèces de Listeria sont ensemencées sur cette même gélose pour s'assurer de la bonne lecture de la boîte.Nous pouvons donc voir que les recherches de pathogènes selon les normes spécifiées dans les différents cahiers des charges des produits organiques et supports de cultures peuvent être longues. Il faut compter de quatre jours si aucune colonie suspecte ne pousse sur nos milieux de culture à une dizaine de jours si des confirmations doivent être faites. Ce résumé met en avant également qu'un résultat positif concernant la recherche de pathogènes comme les Salmonella et les Listeria monocytogenes est le fruit de nombreuses confirmations ne laissant pas de place au doute quant à la fiabilité du résultat rendu.

L'unité de microbiologie du laboratoire LCA est accréditée par le Cofrac pour les analyses des matières fertilisantes et des supports de culture relevant de sa portée d'accréditation.

# LA CHASSE AUX ŒUFS

*Publication du 5 avril 2013*

La recherche des œufs (d'helminthes !) n'est pas un jeu d'enfant… Les helminthes, ce sont des vers parasites auxquels s'intéressent la réglementation sur l'épandage des boues hygiénisées d'épuration (urbaines et éventuellement industrielles ou papetières), les textes édictant les règles applicables aux sous-produits animaux non destinés à la consommation humaine, ainsi que plusieurs normes applicables aux matières fertilisantes. Cet article de l'AgroReporter fait le point sur ces parasites : les raisons de l'intérêt qu'on leur porte, les critères réglementaires, les méthodes d'analyses, leur capacité de résistance dans l'environnement.

## QUI SONT LES HELMINTHES ?

Les helminthes sont des vers parasites intestinaux, qui peuvent se présenter soit sous forme d'œufs, soit sous forme de larves.

Les parasites sont des êtres vivants qui, pendant toute ou partie de leur existence, vivent aux dépens d'autres êtres appelés « hôtes ». L'hôte dit « définitif » est celui chez lequel le parasite accomplit sa fonction de reproduction. L'hôte « intermédiaire » héberge les formes larvaires jusqu'au stade infestant.

Dans ce groupe des helminthes, on distingue deux familles de parasites : les nématodes et les cestodes.

- Les nématodes sont des vers ronds au corps non segmenté. On y trouve des espèces comme les Trichuridés, les Ascaris ou Toxocara.
- Les Cestodes sont des vers plats au corps segmenté. On y retrouve des espèces comme les Taenia ou Hymenolepis.

Au laboratoire, pour les prélèvements environnementaux (boues, composts,…) sont dénombrés ou recherchés uniquement les œufs d'helminthes, les larves n'étant pas prises en compte. C'est la présence de ces œufs qui crée le risque d'infestation en libérant la larve ultérieurement.

L'aspect infectieux de l'œuf d'helminthe est dépendant de sa viabilité. En effet, un œuf d'helminthe non viable n'a aucun pouvoir infectieux car ne libèrera jamais de larve. C'est pour cela que les laboratoires recherchent uniquement les œufs d'helminthes viables.

Le mode de transmission chez l'homme se fait le plus souvent par l'ingestion d'œufs viables à partir de différents vecteurs comme les légumes ou fruits souillés de terre, eau de boisson souillée ou par des mains contaminées. Sur ce dernier point, l'ingestion de sol (ou géophagie) par les enfants n'est pas négligeable. En cas de sol contaminé, cette ingestion de terre peut correspondre à plusieurs dizaines d'œufs ingérés par jour.

La Dose Minimale Infectante (DMI), qui correspond à la quantité de pathogènes qui doit être absorbée pour que des symptômes de la maladie se manifestent chez quelques sujets au moins, est difficile à établir. On sait qu'elle varie en fonction des espèces de pathogènes, et en fonction de l'âge et de l'état de santé de l'hôte. La DMI des helminthes serait faible (1 à 10 œufs viables pour Ascaris). Associée à leur importante capacité de survie dans le milieu et à leur émission abondante par les selles, la faible DMI explique que les helminthes soient des pathogènes particulièrement préoccupants.

## SURVIE DANS L'ENVIRONNEMENT

La durée de vie des œufs d'helminthes est dépendante des conditions environnementales. Ces parasites apprécient des températures modérées (entre 10 et 40°C) et une humidité importante. Dans ces conditions, les œufs peuvent survivre plusieurs mois dans leurs milieux.

L'efficacité des traitements hygiénisants utilisés dans le domaine environnemental varie selon le genre des œufs présents. D'une manière générale, plus l'intensité du traitement est importante, plus court est la durée de traitement pour arriver à une bonne efficacité.

| Genre | Traitement | Efficacité |
|---|---|---|
| Ascaris | -Digestion aérobie ou anaérobie thermophile.<br>-Compostage avec montée en température > 60°C | Bonne |
| Trichuris | -Digestion aérobie, éventuellement suivi d'un lit de séchage pour les boues.<br>-Sédimentation, lagunage pour les eaux usées. | Bonne |
| Ténia | -Pasteurisation (70°C/30 min).<br>-Radiations.<br>-Chaulage (pH > 12 / 24 h). | Bonne |

*Source : « les agents biologiques d'intérêt sanitaire de boues d'épuration urbaines » par ADEME et faculté de pharmacie de Nancy.*

## EN PRATIQUE AU LABORATOIRE

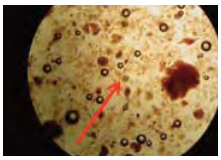
Le principe de la recherche des œufs d'helminthes viables repose, après l'étape de récupération par flottations successives, sur une observation microscopique. L'échantillon se retrouve, une fois préparé, sur plusieurs lamelles et elles sont observées dans leur intégralité. A titre indicatif, la recherche d'œufs d'helminthes viables sur 1,5 g demande environ 2 heures de lecture au microscope pour un échantillon, pour un technicien habitué. La méthode est normalisée (XP X 33-017).

Cette recherche étant basée uniquement sur une reconnaissance visuelle, la formation et l'habilitation du personnel sont donc essentielles.
Les photos qui suivent, prises par le service Microbiologie du LCA, présentent des images des lectures d'échantillons.

œufs de d'ascaris (x40)

œufs de toxara (x40)

œufs de trichuridé (x10)


Vue d'ensemble au grossissement x10 :
on y observe de nombreux débris de végètaux...
et un œuf caché au milieu... (Source : LCA)

## CRITÈRES RÉGLEMENTAIRES

Les normes existantes sur les amendements organiques et les supports de culture (NF U44-051, NF U44-095, NF U44-551) demandent de vérifier l'absence d'œufs d'helminthes viables dans 1 g de produit. La méthode officielle à utiliser est la norme XP X33-017. L'unité rendue est alors 1,5 g (imposé par la norme).

Dans le cas des boues des stations d'épuration urbaines hygiénisées destinées à l'épandage selon l'arrêté du 08/01/1998, il est demandé de vérifier l'efficacité du traitement lors de la mise en service de l'unité de traitement, en analyses initiales en sortie de la filière de traitement. La concentration suivante doit être respectée : œufs d'helminthes viables < 3/10 g MS (selon la méthode EPA modifiée).

Les règles sanitaires applicables aux sous-produits animaux et produits dérivés(1) non destinés à la consommation humaine citent également certains helminthes (réduction du nombre d'œufs d'ascaris par exemple) comme indicateurs pour valider les capacités d'hygiénisation dans les dossiers de conversion des installations de compostage et de méthanisation mettant en œuvre des procédés thermiques.

# MICROBIOLOGIE : LE COMPTE EST BON

*Publié le 23 janvier 2014*

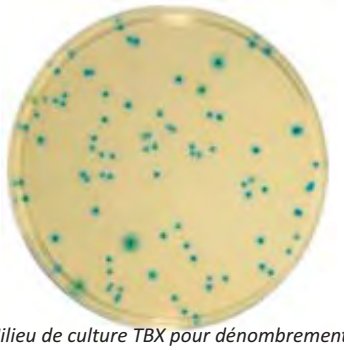
Recherche, dénombrement (dans 1, 10 ou 25 grammes), UFC, NPP… il n'est pas toujours facile de savoir comment doivent être exprimés les résultats d'une analyse microbiologique et comment les interpréter ! Cet article de l'AgroReporter fait le point sur les différents modes d'expression des résultats en microbiologie, plus spécifiquement dans le cas des techniques de dénombrement. Il montre que la méthode, l'expression des résultats, la nature et la destination de l'échantillon doivent former un ensemble cohérent.

## Se conformer au cahier des charges

La première clé d'entrée pour vérifier cette cohérence est le cahier des charges auquel l'échantillon se réfère. Dans le domaine des produits organiques utilisés en agriculture, un grand nombre d'échantillons traités par le service de microbiologie du LCA fait référence aux trois cahiers des charges suivants : NF U44-051, NF U44-095 et NF U44-551. Mais il en existe d'autres ! Ces normes « produit » précisent notamment les différents germes concernés, l'analyse à réaliser (recherche ou dénombrement), l'unité d'expression du résultat et la norme analytique à utiliser pour chacun de ces paramètres. Ce dernier point est très important et mérite d'être développé. Il s'agit de normes issues de la microbiologie alimentaire pour Escherichia coli, Clostridium perfringens, salmonelles et Listeria monocytogenes. Le dénombrement des entérocoques se fait selon une méthode issue de la microbiologie des eaux.

## … puis respecter la norme analytique

Dans le cas des techniques de dénombrement, dans lesquelles le laboratoire va quantifier les germes trouvés dans une certaine quantité de matière, chaque méthode analytique précise une unité pour exprimer le résultat. Il peut s'agir des UFC (Unités Formant Colonies) ou un nombre de bactéries quand il s'agit d'une analyse selon la méthode NPP (Nombre le Plus Probable).
Le premier cas, UFC, est utilisé pour un dénombrement de bactéries en milieu de culture gélosé. Il s'agit alors de compter des colonies qui sont issues, après culture, des bactéries contenues dans l'échantillon. Le principe est qu'une bactérie forme une colonie. C'est donc un dénombrement réel et précis de colonies sur une boîte de Pétri.
Le deuxième cas, le dénombrement selon une méthode NPP, est basé sur une approche statistique. C'est le cas du dénombrement des entérocoques. L'analyse est réalisée à l'aide d'une microplaque contenant 96 puits. Chaque puits contient un substrat qui devient fluorescent sous ultra-violet lorsqu'il est dégradé par la bactérie. La comparaison entre le nombre de puits fluorescents par rapport au nombre de puits ensemencés donne alors un nombre probable de bactéries présentes dans l'échantillon.



*Milieu de culture TBX pour dénombrement Escherichia coli*

*Microplaque sous ultra-violet*

Nous voyons donc que chaque norme analytique a sa propre expression des résultats. Par exemple, pour les échantillons de type compost, le dénombrement d'Escherichia coli se fait selon la norme internationale NF ISO 16649-2. Il s'agit d'un dénombrement de colonies d'Escherichia coli en milieu gélosé. C'est la méthode demandée dans les différentes normes « produit » NF U44-XXX. De ce fait l'expression du résultat se fera toujours en UFC/g MB. C'est ainsi qu'est, de fait, exprimée la limite à ne pas dépasser pour chaque produit.

## Conséquence sur les valeurs d'interprétation

Des normes analytiques, autres que NF ISO 16649-2, existent pour dénombrer Escherichia coli. Par exemple le fascicule FD CEN/TR 15214-2 utilise le principe de la méthode NPP en microplaques de 96 puits pour dénombrer cette bactérie. Cette méthode n'est pas inintéressante mais elle exprime un résultat en nombre de bactéries/g MB et non en UFC/g MB. Ce fascicule, tout comme toute autre norme utilisant ce même principe analytique, ne peut pas être utilisé pour exprimer un avis de conformité sur ces produits. Un résultat exprimé en UFC n'est pas comparable à un résultat obtenu avec une méthode NPP. Il est très important que les unités soient respectées pour comparer deux valeurs. L'ordre de grandeur entre les résultats obtenus selon ces deux principes de méthodes n'est pas comparable. Il n'est pas rare, à matrice constante, de trouver un facteur 10 de différence en faveur de la méthode utilisant le principe du NPP.

Ainsi, dans tous les cahiers des charges, la valeur ainsi que l'unité de chaque limite fixée est toujours dépendante de la norme analytique qui est citée. Les laboratoires accrédités par le Cofrac offrent la garantie de la fiabilité sur les normes utilisées afin de conclure sur un avis de conformité.

***Le site WIKILCA contient un grand nombre d'informations sur les fréquences analytiques, les choix de menus et l'interprétation des résultats d'analyses. En cas de doute pour vos demandes d'analyses, n'hésitez pas à contacter votre chargé d'affaires. Enfin, le service microbiologie du LCA se tient également à votre disposition pour toute information technique complémentaire.***

# MICROBES : L'ÉTÉ MEURTRIER

*Publié le 5 juin 2014*

Des critères de qualité microbiologique peuvent être imposés aux produits organiques valorisés en agriculture. Les normes, décrets, arrêtés applicables demandent alors de rechercher et/ou de dénombrer certains microorganismes, afin de garantir l'innocuité de ces matières pour les hommes et les animaux. Mais qu'en est-il du devenir et de la résistance des germes dans l'environnement ? Plusieurs articles de l'AgroReporter, ont abordé ces microorganismes avec une approche des techniques de laboratoire :

- Les germes indicateurs de traitement : les bactéries nous parlent (09/06/2011)
- Recherche des bactéries pathogènes (salmonella et listeria) : les bactéries dans le Petri (20/12/2012)
- Recherche des œufs d'helminthes viables : la chasse aux œufs (05/04/2013)
- Les techniques de dénombrement (UFC, NPP) : le compte est bon (23/01/2014)

Cet article s'intéresse aux conditions qui vont influencer la durée de vie des microorganismes dans l'environnement.

## Environnement et durée de vie des microorganismes

Divers facteurs peuvent modifier la durée de vie et la virulence des agents pathogènes. Mais certains paramètres influent plus que d'autres sur la durée de vie dans l'environnement, et ce quel que soit le microorganisme étudié. La température, la dessiccation et le pH font partie de ces paramètres ayant un impact important sur le développement et/ou la durée de vie des bactéries, autres parasites et virus. Dans l'ensemble, une température supérieure à 60 °C est létale pour les microorganismes. Cet effet est à pondérer avec la durée d'exposition. Plus la température sera élevée et plus il sera possible de diminuer la durée d'exposition afin d'arriver à ce résultat. L'effet hygiénisant de ce couple « temps x température » a été étudié de façon approfondie dans le cas du compostage (Tableau 1).

| Micro-organismes | Couple temps/T° | Niveau d'abattement et autres particularités | Sources |
|---|---|---|---|
| Salmonelles | Quelques jours/ 35°C | Inactivation | Merle et Olson (1999) |
| | 27 jours/50°C | Réduction de 2 $log_{10}$ ≤ seuil détection | Pourcher et al. (2005) |
| | 32 jours/>50°C | [C] < seuil de détection (1) | Hussong et al. (1985) |
| | 3 jours/55°C | Eradication | Grewal et al. (2006) |
| | 59 jours/60°C | Eradication ([C] : 8 log) | Droffner et Brinton (1995) |
| | 9 jours/70°C | Eradication ([C] : 8 log) | Droffner et Brinton (1995) |
| | 6 semaines | Décroissance – boue de STEP – ↘5 log | Hussong et al. (1985) |
| Entérocoques | 111 jours/40 à 69°C | Réduction de $4log_{10}$ (2) | Pourcher et al. (2005) |
| Listéria | 8 jours/>50°C | [C] < seuil de détection (1) | Hutchison et al. (2005) |
| | 111 jours/40 à 69°C | ↘ 1 à 2 log - [C] < seuil de détection (1) | Pourcher et al. (2005) |
| | 3 jours/55°C | Eradication | Grewal et al (2006) |
| Campylobacter | 1 semaine/35°C | Elimination | Merle et Olson (1999) |
| | 8 jours/>50°C | [C] < seuil de détection (1) | Hutchison et al. (2005) |
| E. coli | 111 jours/40 à 69°C | Réduction de 3 log10 (2) | Pourcher et al. (2005) |
| | 8 jours/>50°C | [C] < seuil de détection (1) | Hutchison et al. (2005) |
| | 3 jours/55°C | Eradication | Grewal et al. (2006) |
| | 2 heures/55°C | Inactivation | Turner (2002) |
| | 59 jours/60°C | Eradication ([C] : 8 log) | Droffner et Brinton (1995) |
| | 9 jours/70°C | Eradication ([C] : 8 log) | Droffner et Brinton (1995) |
| Entérovirus | 76 jours/50°C | ↘ 2 log - [C] < seuil de détection (1) | Pourcher et al. (2005) |
| Clostridium perfringens | 111 jours/40 à 69°C | ↘ 2 $log_{10}$ (2) | Pourcher et al. (2005) |
| Œufs d'helminthes | 20 jours/52°C | Inactivation | Venglovsky et al. (2006) |
| | 3-5 jours/52°C | Inactivation en milieu alcalin | |
| Œufs d'Ascaris | Quelques jours/35°C | Réduction | Merle et Olson (1999) |
| | 31 jours/37°C | Eradication | Tharaldsen et Helle (1989) |

(1) Effluents porcins – Germes anaérobies. (2) Compostage de boues urbaines avec de la paille – 4 retournements sur 111 jours – T° minimales et maximales mesurées dans 3 zones du tas de compost

*Tableau 1 : effet hygiénisant de quelques couples temps x température au cours du compostage. Données bibliographiques (Source : Duvasseur et Dutrémé, 2007 in TechniPorc)*

Dans le cas du compostage, l'intensité et la durée de la phase thermophile ne sont pas les seuls facteurs d'hygiénisation : la dessication, l'augmentation du pH et de la concentration en azote ammoniacal, les phénomènes de compétition microbiologique y contribuent également. De même, un sol chargé d'un point de vue microbiologique peut être responsable de survies plus courtes de certaines bactéries comme les salmonelles, du fait de ces phénomènes de compétition.

D'une façon générale, une humidité importante est favorable à la survie des microorganismes ainsi qu'un pH neutre. Pour cette raison, l'été n'est pas une saison favorable à la survie des bactéries en raison des effets combinés de la sécheresse et des rayons UV.

## Formes de résistance

Reste une particularité qui nous intéresse : la capacité du Clostridium perfringens à sporuler. Cette bactérie est capable de synthétiser une spore lorsque les conditions de vie deviennent défavorables, ce qui lui confère une résistance importante aux températures extrêmes ainsi qu'aux pH élevés. Le déterminisme de la sporulation est environnemental : un arrêt de croissance bactérienne dû à un manque de molécules nutritives, à l'exposition à une atmosphère oxygénée, ou à la déshydratation provoque l'acquisition de cette forme de résistance. La présence de conditions de croissance favorables permet le retour à la forme végétative.

## Quelques chiffres

La bibliographie nous fournit quelques informations sur la survie dans l'environnement de certains microorganismes recherchés dans les produits organiques (1) :

• Salmonella : elles sont sensibles à la chaleur mais résistent bien à la dessiccation (plus de 3 mois dans des fèces desséchées). Elles survivent environ 100 jours dans l'eau, 20 à 70 jours dans les végétaux et 1 000 jours dans les fèces de bétail.

• Listeria : elles résistent bien à la dessiccation, survivant de nombreux mois dans le sable, terre, matières en décomposition. Contrairement à la plupart des autres bactéries, elles sont psychrophiles, c'est-à-dire qu'elles peuvent se développer aux basses températures.

• Coliformes (dont Escherichia coli) : d'une manière générale, les coliformes survivent moins de 10 semaines dans les sols. Sur les récoltes, l'exposition au soleil limite leur survie.

• Les entérocoques : dans les eaux, la survie est d'environ 20 jours. Dans les sols et les boues, cela peut aller de quelques semaines à plusieurs mois.

• Clostridium perfringens : les formes végétatives de Clostridium perfringens sont fortement détruites lorsque la température atteint 65°C, alors que les formes sporulées de ce germe ne sont abattues que par des températures supérieures à 70-80°C. Lors d'expériences sur des refus de centrifugation de lisier de porcs maintenus pendant 3 jours à des températures de 55, 60 et 70°C, seule la température de 70°C pendant 72 heures a permis une élimination des spores. Ces conditions ont aussi été vérifiées pour le compostage (2) . Ce germe ne se développe qu'en conditions anaérobies, mais il est capable de résister à des conditions semi-aérobies.

• Parasites (œufs d'helminthes) : à une température comprise entre 20 et 50 °C et avec une humidité importante, la durée de vie est de plusieurs mois.

• Enterovirus : disparition dans les boues déshydratées après un an de stockage en décharge.

***Les conditions de développement et de survie des microorganismes dépendent de la bactérie, du virus ou du parasite considéré. La qualité microbiologique d'un produit organique dépendra donc à la fois du type et du niveau de la contamination initiale, mais aussi des conditions auxquelles ce produit aura été soumis. De ce fait, outre la vérification de la conformité d'un produit à la réglementation, les analyses microbiologiques de matières fertilisantes sont aussi un outil de diagnostic ou de pilotage des procédés de traitement. N'hésitez pas à nous contacter !***

# ORGANISMES PATHOGÈNES DES PLANTES : DES NUISIBLES SOUS TRÈS HAUTE SURVEILLANCE

*Publication du 2 mai 2013*

Les plantes, tout comme les animaux, sont menacées par des maladies causées par des organismes pathogènes. Ces maladies ne sont pas sans conséquences pour les cultures, pouvant entraîner des pertes considérables en termes de qualité ou de rendement des denrées produites. Les échanges mondialisés de matériel ou produits végétaux, et tout particulièrement le commerce de matériel végétal de multiplication, a augmenté de manière exponentielle le risque de dissémination de ces maladies et leur implantation dans des zones initialement indemnes. Pour contrôler, autant que faire se peut, la dissémination des maladies des plantes, des mesures ont été mises en place. Après une rapide présentation des organismes en cause, cet article de l'AgroReporter décrit les acteurs et les moyens de cette surveillance

## ORGANISMES NUISIBLES

**Un organisme nuisible** est, par définition, un organisme dont le développement et l'activité sont considérés comme négatifs pour l'homme et les activités humaines. Dans le domaine plus restreint des végétaux et de la protection des cultures, un organisme nuisible est un organisme vivant appartenant au règne animal, végétal ou microbien (bactéries, champignons, virus…) dont la présence sur un territoire donné n'est pas souhaitée en raison d'un effet néfaste pour les végétaux ou les produits végétaux. On emploie le terme de « **ravageur** » pour désigner les animaux (mammifères, oiseaux, insectes, nématodes) ou les végétaux supérieurs (plantes parasites, mauvaises herbes) prédateurs ou parasites des plantes. On parlera de « **maladies** » pour désigner les attaques causées par des champignons, des bactéries, des phytoplasmes ou des virus.

## ORGANISMES NUISIBLES DE QUARANTAINE

Tous les organismes nuisibles n'ont toutefois pas le même statut et n'induisent pas les mêmes risques en termes de dangerosité et de potentiel de dissémination. Aussi la **FAO (Food and Agriculture Organization)** a été amenée à introduire la notion d'**organisme de quarantaine**, dont la définition est celle d'un « organisme nuisible qui a une importance potentielle pour l'économie de la zone menacée et qui n'est pas encore présent dans cette zone, ou bien qui y est présent mais n'y est pas largement disséminé et qui fait l'objet d'une lutte officielle ». Un organisme de quarantaine est un organisme nuisible qui fait l'objet d'une réglementation spécifique.

## FAO : HAUTE AUTORITÉ DE SURVEILLANCE DES ORGANISMES NUISIBLES

Créée en 1945, prenant la suite de l'Institut International d'Agriculture (lui-même créé en 1905) la FAO est une organisation des Nations Unies qui regroupe 191 membres (190 états et l'Union Européenne). Dédiée à l'alimentation et à l'agriculture, son objectif affiché est « d'aider à construire un monde libéré de la faim ». Au sein de la FAO, la **Convention Internationale pour la Protection des Végétaux** (CIPV) procure une assistance technique en matière de gestion de la quarantaine végétale. Elle prend en charge la protection des plantes cultivées et sauvages en prévenant l'introduction et la dissémination des organismes nuisibles. La CIPV concoure à l'harmonisation au niveau international des mesures phytosanitaires, avec pour objectif la gestion de la santé des végétaux au plan mondial, tout en maintenant cohérent et fluide le commerce des denrées alimentaires.

L'action de l'établissement se décline dans le cadre d'acteurs régionaux, par le biais des Organisations Régionales de la Protection des Végétaux (**ORPV**), et d'acteurs nationaux, par le biais des Organisation Nationales de la Protection des Végétaux (**ONPV**).

## LES ORGANISATIONS RÉGIONALES DE LA PROTECTION DES VÉGÉTAUX (ORPV)

A ce jour, le monde est divisé en 9 régions où interviennent des organisations intergouvernementales chargées de la coopération dans le domaine de la protection des plantes et du suivi des organismes nuisibles.
Ces organisations sont les suivantes :

- **La Commission phytosanitaire pour l'Asie et le Pacifique** (APPPC) : créée en 1956, elle regroupe 24 pays d'Asie du Sud Est et d'Australasie.
- **La Communauté andine** (CA) : créée en 1969, elle regroupe 4 pays (Bolivie, Colombie, Equateur et Pérou).
- **Le Comité de protection des plantes du Cône Sud** (COSAVE) : créé en 1989, il regroupe 5 pays (Argentine, Brésil, Chili, Paraguay et Uruguay).
- **La Commission de la protection des plantes dans la zone des caraïbes** (CPPC) : créée en 1967, elle regroupe 22 pays de la région des Caraïbes.
- **L'organisation européenne et méditerranéenne pour la protection des plantes** (OEPP) : créée en 1951, elle regroupe 50 pays représentant pratiquement tous les pays de la région européenne et méditerranéenne.
- **Le Conseil phytosanitaire interafricain** (CPI) : créé en 1954, il regroupe 18 pays du continent africain.
- **L'Organisation nord-américaine pour la protection des plantes** (NAPPO) : créée en 1952, elle regroupe 3 pays (Canada, Etats-Unis et Mexique).
- **L'Organisme international régional contre les maladies des plantes et des animaux** (OIRSA) : créé en 1953, il regroupe 9 pays d'Amérique Latine.
- **L'Organisation de protection des végétaux pour le Pacifique** (PPPO) : créée en 1994, elle regroupe 22 pays de la zone Pacifique.

La France participe à quatre de ces organisations : APPPC, CPPC, OEPP et PPPO.

## LES ORGANISATION NATIONALES DE LA PROTECTION DES VÉGÉTAUX (ONPV)

Des dispositifs nationaux, propres à chaque état, sont également mis en place dans chaque pays. Ainsi, au niveau français, la santé et la protection des végétaux, et la gestion des organismes nuisibles des plantes sont placées sous la tutelle du Ministère de l'Agriculture au niveau de la **Direction Générale de l'Alimentation** (DGAL).

Un système régional décentralisé articulé autour des Services Régionaux de l'Alimentation (SRAL) prend en charge la protection des cultures et la surveillance du territoire vis-à-vis des organismes de quarantaine, selon les directives établies au plan national.

[…]

[...]

Enfin, une troisième structure intervient : le Laboratoire de la Santé des Végétaux (LSV), structure dépendant de l'Agence Nationale de Sécurité Sanitaire de l'Alimentation, de l'Environnement et du Travail (ANSES). Le LSV est l'organe de référence analytique, d'appui scientifique et technique, et d'évaluation des risques en matière de santé des végétaux. Entre autres missions, cette structure intervient pour le développement de méthodes officielles de détection et de diagnostic des organismes de quarantaine ainsi que pour l'animation d'un réseau de laboratoires agréés pour effectuer les analyses officielles (analyses liées à la surveillance du territoire). **Le laboratoire LCA fait partie de ce réseau de laboratoires agréés.**

## GESTION DES ORGANISMES DE QUARANTAINE

La communauté internationale a élaboré des règles communes pour éviter la dissémination des organismes agricoles nuisibles, en premier lieu par l'établissement d'une liste d'organismes contre lesquels des mesures doivent être prises. Cette liste d'organismes de quarantaine se décline de manière mondiale (CIPV), régionale (ORPV) ou nationale (ONPV). Compte-tenu du coût élevé des mesures préventives, seuls les organismes les plus importants sont pris en considération, c'est-à-dire ceux causant des dommages agricoles avérés et/ou dont la dissémination peut être combattue efficacement.

*Trois exemples d'agents pathogènes de quarantaine réglementés en France*

*Virus de la Sharka sur pêches* — *Flavescence Dorée sur cépages rouges* — *Virus de la Mosaïque du Pépino sur tomate*

Les politiques de luttes mises en œuvre dépendent de la dimension de la zone menacée (région, pays, continent). Il est important que l'espace d'origine de l'organisme de quarantaine ne serve pas de source pour sa dissémination vers d'autres espaces.

Influencée par la dynamique de dissémination de l'organisme de quarantaine, la situation est susceptible d'évoluer à la fois dans le temps et dans l'espace. Aussi, en fonction de la situation à un instant donné, différentes mesures de lutte officielles pourront être définies :

- Interception : l'organisme de quarantaine n'est pas encore arrivé dans la zone concernée. Les mesures se limitent à contrôler l'importation
- Eradication : l'organisme de quarantaine est constaté localement. L'objectif devient son éradication de la zone
- Enrayement : l'organisme de quarantaine est établi au niveau régional. L'objectif sera alors de ralentir sa dissémination
- Suppression : l'organisme est répandu pratiquement dans la zone entière. Les mesures officielles concerneront les conséquences sur d'autres zones, et prendront en compte les intérêts de l'agriculture locale

L'OEPP met à disposition une base de données, appelée PQR, sur les organismes de quarantaine. Elle contient des informations actualisées sur leurs plantes-hôtes, leur répartition géographique et les filières qui sont susceptibles d'entraîner leur dissémination. La base PQR est téléchargeable depuis le site Internet de l'OEPP (télécharger « PQR»).

# ELISA

*Publié le 12 mai 2011*

Le Laboratoire LCA dispose d'une unité analytique spécialisée en phytopathologie (virologie, bactériologie, mycologie végétale). Ce service traite plus de 20 000 échantillons pour la recherche de 100 000 pathogènes différents par an (tests ELISA et PCR). Le LCA est accréditée par le Cofrac (programme 163 – Essais et analyses en virologie végétale ; détection des virus, viroïdes et phytoplasmes pathogènes végétaux), et agréée par le Ministère de l'Agriculture et de la Pêche, pour la détection d'organismes nuisibles sur végétaux et produits végétaux.

La pathologie des plantes, ou **phytopathologie**, est aux plantes ce que la médecine est à l'homme et la médecine vétérinaire aux animaux. Elle se définit comme la discipline scientifique qui étudie les micro-organismes pathogènes (champignons, bactéries, virus) et les facteurs environnementaux qui induisent des maladies chez les plantes, mais aussi les mécanismes par lesquels ces différents éléments agissent, ainsi que les méthodes de prévention et de contrôle des maladies.

Cette discipline repose sur un concept central que les anglo-saxons ont appelé "Disease Triangle" (Triangle de la Maladie), dont le postulat est que le développement d'une maladie repose sur l'interaction entre l'agent pathogène incriminé, la plante hôte et les conditions environnementales.

Il nous apparaît aujourd'hui évident que l'absence de contrôle des maladies des plantes peut avoir des effets dramatiques sur la production et/ou la qualité des denrées agricoles, et des conséquences économiques extrêmement néfastes. Ce ne fut pas toujours aussi évident. Et même si la Phytopathologie débute forcément de manière intuitive et empirique dès les origines de l'agriculture, il y a environ 9000 ans, ce n'est qu'à partir du XIXème siècle qu'elle sera officiellement considérée comme une discipline scientifique. Une première prise de conscience de l'importance de cette discipline se fera avec la dramatique famine irlandaise, qui provoqua, entre 1846 et 1851, le décès d'un million de personnes, l'exil d'une partie importante de la population (deux millions de personnes) et une refonte de l'organisation de la propriété foncière. A l'origine de cette terrible situation : le champignon Phytophtora infestans, agent responsable de la maladie du mildiou, qui en 1845 a pratiquement anéanti d'un coup les cultures locales de pomme de terre, nourriture de base des paysans irlandais.

## LA MAÎTRISE D'UNE MALADIE INFECTIEUSE NÉCESSITE DE SAVOIR RAPIDEMENT ET PRÉCISÉMENT QUEL EST L'AGENT PATHOGÈNE IMPLIQUÉ...

Le diagnostic en pathologie végétale, ou phytodiagnostic constitue l'une des activités fondamentales liées au "Disease Triangle" de la pathologie végétale. Il consiste en la détection, l'identification et la caractérisation des agents pathogènes des plantes (virus, bactéries, champignons) et constitue un enjeu important pour la maîtrise et le contrôle des maladies infectieuses des variétés végétales cultivées.

**Le phytodiagnostic recouvre en fait deux aspects distincts :**
**l'identification :** dans ce cas, sur la base d'un individu unique ou d'un lot d'individus présentant une symptomatologie précise, l'objectif sera de mettre en évidence et d'identifier l'agent pathogène responsable des symptômes observés ;
**la détection** : il s'agit alors de rechercher, par l'intermédiaire d'une méthode éprouvée, l'éventuelle présence d'un pathogène précis au sein d'une population d'individus asymptomatiques. C'est le contrôle de l'état sanitaire du matériel végétal, que ce soit en cours ou en phase finale de production.

## QUI DIT DIAGNOSTIC, DIT TECHNIQUES DE DIAGNOSTIC...

Les techniques mises en œuvre pour le phytodiagnostic sont variées et sont aussi le reflet des évolutions des scientifiques, depuis les méthodes de base :

> Observation et classification des symptômes, reflets de l'expression d'un pouvoir pathogène

> Observation et caractérisation des agents pathogènes par examen visuel (observation visuelle ou microscopique)
> Isolement et culture des agents pathogènes sur milieux artificiels (milieux semi-sélectifs ou sélectifs)

## JUSQU'AUX MÉTHODES LES PLUS SOPHISTIQUÉES ISSUES DES BIOTECHNOLOGIES :

> Méthodes immunologiques, reposant sur l'interaction anticorps / antigène (test ELISA)
> Biologie moléculaire (amplification génique ou test PCR, microarray - puces à ADN)

## TOUTEFOIS, ET QUEL QUE SOIT LE DEGRÉ DE COMPLEXITÉ TECHNIQUE, LES CRITÈRES D'ÉVALUATION DE CES MÉTHODES RESTENT IDENTIQUES. LES TROIS PRINCIPAUX CRITÈRES SONT :

> la sensibilité (capacité du test à diagnostiquer positifs tous les échantillons positifs du panel analysé ou vrais positifs) ;
> la spécificité (capacité du test à diagnostiquer négatifs tous les échantillons négatifs du panel analysé ou vrais négatifs);
> le seuil de détection (détectabilité), défini comme étant la quantité (ou concentration) minimale d'analyte que le test permet de détecter.

On adjoindra à ces critères théoriques d'autres critères plus en lien avec la réalisation pratique des tests : robustesse et simplicité de mise en œuvre, possibilité d'utilisation « en routine » (permettant le traitement d'un très grand nombre d'échantillons), possibilité d'automatisation des étapes du test, coût de mise en œuvre des analyses de diagnostic...

## LE CHOIX D'UNE TECHNIQUE DE PHYTODIAGNOSTIC EST LIÉ À LA FINALITÉ DU DIAGNOSTIC RÉALISÉ...

Ainsi, dans le cas d'un diagnostic de type "Identification", l'approche utilisée se devra d'être surtout spécifique (elle pourra d'ailleurs résulter de la combinaison de plusieurs méthodes complémentaires). Le nombre d'échantillons concernés par une telle approche étant généralement faible, le coût et le caractère fastidieux des méthodes utilisées ne sera pas forcément un facteur limitant.

A l'inverse, dans le cas d'un diagnostic de type "Détection", la méthode utilisée devra impérativement être sensible, en raison du caractère asymptomatique du matériel analysé. L'analyse portant sur un grand nombre d'échantillons, coût et simplicité de mise en œuvre deviennent des critères très importants.

# Virose de la vigne : ELISA mène l'enquête

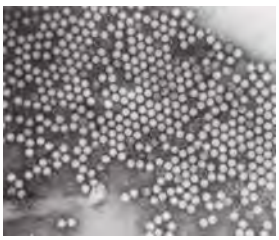
*Publié le 16 janvier 2014*

Dans le domaine viticole, greffons et porte-greffes peuvent transmettre à leur descendance des agents pathogènes lorsqu'ils en sont eux-mêmes porteurs. C'est pourquoi le contrôle du matériel de base est particulièrement important vis-à-vis des virus de la vigne, qui sont transmis très efficacement par greffage. Quels sont les virus recherchés en pépinière viticole ? Quelles sont les modalités de ce contrôle ? Cet article vient compléter les parutions antérieures de l'Agro Reporter sur le thème des phytovirus et de la sélection clonale : Virus vitifera ou l'effet papillon, Elisa.

## VIRUS EN CAUSE

Les principaux virus dommageables à la culture de la vigne appartiennent aux groupes des Népovirus, des Ampélovirus et des Clostérovirus.
Les Népovirus, de forme sphérique, sont transmis à la vigne par des nématodes présents dans le sol. Ces virus sont responsables des maladies de dégénérescence de la vigne. Deux de ces virus sont d'importance majeure car ils provoquent la maladie du Court-Noué de la Vigne : l'Arabis Mosaic Virus (ArMV) et le Grapevine Fan Leaf Virus (GFLV).

Les Clostérovirus et Ampelovirus sont constitués de longues particules filamenteuses et flexueuses. Ils sont transmis par des insectes aériens, les cochenilles. Une dizaine de ces virus ont été décrits sur la Vigne, responsable des symptômes d'enroulement foliaire. Trois d'entre eux sont couramment rencontrés sur le territoire national : deux Ampelovirus, les Virus de l'Enroulement de la Vigne Types 1 et 3 (Grapevine Leaf Roll Virus : GRLaV-1 et GLRaV-3), et un Clostérovirus, le Virus de l'Enroulement de la Vigne Type 2 (GLRaV-2).



Népovirus

Clostérovirus

Particules virales vues en microscopie électronique

## OBLIGATION DE CONTRÔLE EN PÉPINIÈRE

La réglementation en vigueur, fixée par l'Arrêté du 20 septembre 2006 relatif à la sélection, à la production, à la circulation et à la distribution des matériels de multiplication végétative de la vigne, rend obligatoire pour les pépiniéristes viticoles le contrôle sanitaire des parcelles de vignes mères de greffons et de porte-greffes vis-à-vis des maladies virales du Court-Noué (Virus ArMV et GFLV) et de l'Enroulement Viral (les virus concernés étant le GLRaV-1 et le GLRaV-3). Cette réglementation a pour objet l'éradication des parcelles de vigne-mères virosées et la mise en circulation de jeunes plants de vigne indemnes d'infections virales, garantissant ainsi la non propagation des virus lors des opérations de greffages porte-greffes / greffons et d'implantation des jeunes plants de vigne sur les parcelles de production.

## MODALITÉS DE CONTRÔLE

France Agrimer (1) est l'organisme officiel chargé du contrôle des bois et plants de vigne. Ses agents veillent au respect de la traçabilité du matériel végétal et délivrent, avant commercialisation, un certificat attestant du respect des règles de production des plants de vigne en catégorie certifiée.
Les professionnels prennent en charge eux-mêmes les suivis de leurs parcelles dans le cadre d'un autocontrôle : un premier test virologique est réalisé en 5ème feuille (au plus tard 5 années après plantation), puis la parcelle doit être contrôlée tous les dix ans.

Le test mis en œuvre pour le diagnostic virologique est un test sérologique ELISA (acronyme d'Enzyme Linked Immuno Sorbent Assay) effectué au laboratoire. Il s'agit d'une méthode immunochimique combinant une réaction de type antigène / anticorps couplée à une réaction colorimétrique qui permet de mettre en évidence les protéines constitutives des virus (marqueurs de l'infection virale) dans des extraits végétaux. Les tests sont réalisés, par des laboratoires agréés, selon les préconisations d'une Méthode Officielle (Détection des Virus de la Vigne par la technique sérologique DAS-ELISA – Méthode vv./04/05 version b) développée par le Laboratoire de la Santé des Végétaux (laboratoire national de référence rattaché à l'ANSES (2)).

Test ELISA – Réaction colorimétrique

Les tests ELISA sont préférentiellement réalisés sur bois aoûtés, pendant la période hivernale de repos végétatif de la vigne. Les protocoles de prélèvement et d'échantillonnage sont établis par France Agrimer.
Le Laboratoire LCA est un acteur majeur du contrôle sanitaire en pépinières viticoles depuis plus de vingt ans. Sur les dix dernières années, le laboratoire a analysé près de 150 000 échantillons dans le cadre de ces contrôles.
Le laboratoire est agréé par le ministère de l'agriculture et accrédité COFRAC pour la Détection des Virus de la Vigne par la technique sérologique DAS-ELISA. Il est conventionné par France Agrimer pour la Réalisation d'Analyses des Viroses de la Vigne dans le cadre du Contrôle et de la Certification des Bois et Plants de Vigne.

Symptômes de dégénérescence caractéristiques de la maladie du court-noué sur Chardonnay

Symptômes d'Enroulement Viral

(1) - L'Établissement national des produits de l'agriculture et de la mer, également appelé France AgriMer, est un office agricole français ayant pour mission d'appliquer, en France, les mesures prévues par la Politique agricole commune, et de réaliser des actions nationales en faveur des différentes filières agricoles.
(2) - L'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Anses) est l'agence nationale française chargée de la sécurité sanitaire. Elle résulte de la fusion des précédentes agences.

# DES PHYTOVIRUS AU LOUVRE

*Publié le 6 octobre 2011*

Ce tableau du peintre français Jacques Linard (1597 - 1645), intitulé "Corbeille de Fleurs" et visible au Musée du Louvre, a toujours fasciné les virologistes spécialistes du monde végétal. En effet, on distingue nettement dans cette corbeille des tulipes flammées qui présentent un panachage de couleurs particulièrement esthétique. On sait pourtant aujourd'hui que ces panachures (1) sont la conséquence... d'une infection par un Virus appartenant au Groupe des Potyvirus, le TBV ou Tulip Breaking Virus !! Ainsi donc, et ce bien avant que l'on soupçonne leur existence, les micro-organismes sévissaient déjà sur les plantes ornementales... Bien sûr, l'exemple pris dans cette introduction confère un aspect plutôt sympathique et élégant à ce virus et au matériel végétal qu'il infecte, mais c'est bien loin d'être une généralité. Car le plus souvent, les symptômes observés sont dommageables au végétal (nécroses, déformations etc...).

## L'HORTICULTURE, UN POTENTIEL ÉCONOMIQUE (2)

La filière de production et de commercialisation des plantes ornementales constitue aujourd'hui un potentiel économique qui est loin d'être négligeable. La consommation des ménages français génère dans ce domaine un chiffre d'affaire annuel de 2,5 milliards d'euros (soit environ 50 € par personne et par an). Le secteur compte 5500 entreprises de production. Cela ne représente que 2% du nombre total des entreprises agricoles, mais leur production représente 6% de la valeur de livraison des produits végétaux et les emplois induits représentent 14% du nombre de salariés permanents de l'agriculture. Ces entreprises comptent en surface 22 000 hectares (dont plus de 10% d'espaces couverts). Enfin, on ajoutera à ce décompte 26 000 entreprises de négoce et 13450 entreprises de services (entrepreneurs paysagistes, élagueurs etc...).
Traditionnellement, la filière se partage en cinq secteurs d'activité : fleurs et feuillage coupés, plantes en pots, plantes à massif, bulbiculture et pépinière. Mais il est assez fréquent que les structures travaillent simultanément sur plusieurs de ces secteurs.

## LES MALADIES DES PLANTES, UNE PRÉOCCUPATION CONSTANTE

Ce qui indéniablement constitue l'attrait et la valeur d'une plante d'ornement, c'est son aspect visuel. Aussi, tout ce qui l'affectera posera problème quant à sa commercialisation.
A ce titre, en raison des symptômes occasionnés et du potentiel de dissémination dans les cultures, les maladies dues à des agents microbiens pathogènes doivent faire l'objet d'une surveillance soutenue.

## LES SITUATIONS RENCONTRÉES ANS LA FILIÈRE SERONT VARIABLES :

**> En fonction des agents pathogènes concernés…**

- Les infections virales et bactériennes n'offrent aucune alternative en matière de traitement curatif. Dès lors qu'un tel pathogène s'installe sur un lot de plantes ornementales, celui-ci est condamné.
Aussi, une surveillance des plantes en propagation devra passer par l'utilisation de matériel végétal garanti indemne ou par un contrôle sanitaire effectué à l'aide de méthodes sensibles permettant une détection des pathogènes avant l'apparition des premiers symptômes.

- Les infections par des champignons pathogènes (maladies cryptogamiques) peuvent être contrôlées par des traitements phytosanitaires adaptés (à condition toutefois que la maladie n'ait pas atteint un stade invasif trop important), ce qui offre plus de latitude que dans le cas précédent. Les caractéristiques biologiques propres aux divers pathogènes conditionnent également les stratégies de contrôle : certains champignons, comme dans le cas des Pythiacées ( Pythium sp. , Phytophtora sp.), sont capables d'infecter à la fois le végétal et le support sur lequel il se développe (sol, terreau). La surveillance des cultures doit donc parfois s'opérer à deux niveaux.

**> En fonction du mode de dissémination…**
Le mode de transmission des pathogènes d'une plante à l'autre doit également être pris en compte. Ainsi la bactérie Xanthomonas campestris pv. pelargonii, redoutable agent causal de la Bactériose du Pélargonium, dispose d'un très fort potentiel de dissémination mécanique (travailleurs, outils, nettoyage des plants). Le virus TSWV (Tomato Spotted Wilt Virus ou Virus des points nécrosés de la tomate), virus ubiquiste infectant de très nombreuses plantes ornementales (3) , est lui transmis d'un végétal à l'autre par un insecte vecteur : le thrips.

**> ... Et en fonction des stades de production**
Dans le cadre de la production de jeunes plants à partir de pied-mères, il faudra s'assurer que le matériel utilisé pour le bouturage est dans un état sanitaire parfait, plus particulièrement au regard des maladies virales et bactériennes qui sont incurables. Les enjeux sont de taille car ce sont des millions de jeunes plants qui sont ainsi produits tous les ans. Les programmes d'analyses mis en oeuvre doivent couvrir un spectre large des pathogènes potentiels, et utiliser des méthodes sensibles et adaptées au traitement en routine d'un grand nombre d'échantillons.

Pour les lots de végétaux en attente de commercialisation, l'apparition d'un symptôme devra faire l'objet d'une identification d'un éventuel pathogène responsable, et ce afin de mettre rapidement en oeuvre les mesures nécessaires au contrôle de la maladie. Les tests mis en oeuvre doivent être rapides, fiables et spécifiques.

## PHYTO-DIAGNOSTIC AU LCA : UNE OFFRE DIVERSIFIÉE ET COMPLÈTE

Depuis maintenant une quinzaine d'années, le Laboratoire LCA propose aux acteurs de la filière horticole une offre diversifiée couvrant l'essentiel des besoins de la profession en matière de Phyto-Diagnostic.

**- Analyses en prestations de service**
Recherche de pathogènes (virus, bactéries et champignons) et confirmation de symptômes. Contrôle de l'état sanitaire des pieds-mères, des jeunes plants et cuttings. Contrôle des supports de culture (sols, terreaux).Méthodes : tests ELISA et PCR, isolement sur milieu de culture.

**- Pour les entreprises équipées d'un laboratoireGamme BIOTEST :**
fourniture de réactifs et consommables pour le test ELISA (virus et bactéries). Catalogue disponible sur simple demande.

**- Kits de détection pour le terrain** Gamme POCKET DIAGNOSTIC : tests rapides (réponse en moins de 5 minutes) utilisables sur le terrain (en serre ou au champ) pour la détection des principaux agents pathogènes des cultures ornementales (virus, bactéries, champignons)

*(1) Les panachures florales sont des symptômes caractéristiques des infections virales qui affectent les pétales ou les sépales. Elles résultent de l'absence de pigments anthocyaniques vacuolaires créant des zones décolorées où le virus se multiplie.*
*(2) Les données citées dans ce paragraphe sont extraites de "Perspectives Economiques des Secteurs de l'Horticulture" - Rapport du Conseil Economique et Social, présenté par Michèle Viguier (Mai 2006)*
*(3) Anémone, bégonia, chrysanthème, cinéraire, cyclamen, dalhia, géranium, gerbera, impatiens, pétunia, violette, yucca... Pour n'en citer que quelques-unes !!*

# VIRUS VITIFERA, OU L'EFFET PAPILLON *(PARTIE 1/2)*

*Publication du 18 octobre 2012*

On dit que le vin est le reflet de son terroir. Et on a raison ! Le terroir quant à lui peut être considéré comme l'association de trois catégories de facteurs : des facteurs physiques (géologie, topographie, pédologie et climatologie), des facteurs humains (pratiques culturales et agronomiques, usages locaux) et des facteurs biologiques, qui sont représentés par la vigne elle-même. Or la vigne que nous connaissons aujourd'hui est le résultat d'une longue sélection par l'homme. Voici l'histoire de la sélection variétale de la vigne, à laquelle ont largement contribué ses plus petits parasites : les virus…

## ORIGINES DE LA VIGNE

Les débuts de la culture de la Vigne remontent à environ 5000 ans avant notre ère, en Asie Mineure. A cette époque, les vignes s'appelaient encore lambrusques (Vitis silvestris, formes sauvages du Vitis vinifera que nous connaissons aujourd'hui). Il est fort à parier que l'homme a, dès cette époque, spontanément et de manière empirique débuté un travail de sélection du matériel végétal. De même, les migrations des hommes ont transporté les cépages, qui ont ensuite été croisés avec les variétés locales, pour obtenir une adaptation à ces nouveaux environnements. Aujourd'hui, la vigne moderne, Vitis vinifera compte environ 6000 cépages identifiés qui sont le fruit de sélections opérées par l'homme depuis environ 7000 ans.

Dans la deuxième moitié du XIXème siècle, un épisode épidémique de grande ampleur va bouleverser le schéma d'amélioration variétale en viticulture. C'est en 1861 qu'apparaît pour la première fois en France le phylloxéra, insecte piqueur inféodé à la vigne et apparenté aux pucerons, capable d'entraîner en trois ans la mort des ceps. L'épidémie va se développer, et en trois ou quatre décennies, va dévaster les vignobles du monde entier, n'épargnant que les vignobles plantés en terre sablonneuse et les plants américains résistants au Phylloxéra. Cet épisode phylloxérique aura pour conséquence directe une modification des pratiques culturales avec le remplacement progressif des vignes non greffées (ou vignes franches de pied) par des vignes greffées, en utilisant des porte-greffes soigneusement sélectionnés pour leur capacité à résister au Phylloxéra. Et surtout, l'importance de la pathologie dans la sélection du matériel végétal deviendra de plus en plus évidente pour les acteurs du processus de sélection.

## TROIS VOIES DE SÉLECTION

Classiquement, on distingue trois voies de sélection, chacune ayant une finalité qui lui est spécifique.

- **La Sélection Conservatrice :** elle a pour objet de maintenir accessible et disponible la biodiversité de l'espèce végétale
- **La Sélection Créatrice :** elle a pour objet de faire naître de nouvelles variétés végétales (par hybridation ou modification du génome), dotées de caractères et de propriétés d'intérêt agronomique.
- **La Sélection Sanitaire :** elle consiste à sélectionner un matériel végétal indemne des agents pathogènes qui peuvent nuire à son développement et à son utilisation.

## LA SÉLECTION AU VIGNOBLE

Dans le domaine viticole, on distingue classiquement deux schémas de sélection variétale :

- La Sélection Massale :

  C'est une pratique ancestrale qui consiste à repérer et à sélectionner un ensemble de plants présentant les meilleurs aspects sur une même parcelle. Les plants sélectionnés sont ensuite globalement multipliés. Cette technique présente l'avantage de maintenir, en la reproduisant, la diversité des plants de vigne. Son inconvénient est qu'il est difficile de maîtriser le comportement et le devenir de la population sélectionnée.

- La Sélection clonale :

  C'est une technique qui se met en place en France à partir des années soixante et qui constitue, depuis, l'approche dominante de sélection variétale. Elle consiste à sélectionner et multiplier des plants de vigne rigoureusement identiques, issus d'une même souche mère. Cette sélection clonale permet une production homogène, avec des particularités constantes. Son but est de fixer certaines caractéristiques agronomiques ou organoleptiques, mais cette sélection clonale a eu un rôle très important en tant qu'outil de sélection sanitaire, et particulièrement vis à vis des Virus de la Vigne.

*« **L'effet papillon** » est une théorie selon laquelle un battement d'ailes de papillon au Brésil peut provoquer une tempête au Texas. Selon l'expression, inventée par le météorologue Edward Lorenz, il suffit de modifier de façon infime un paramètre dans un modèle météo pour que celui-ci s'amplifie progressivement et provoque, à long terme, des changements colossaux. Cette notion ne concerne plus seulement la météo, mais s'applique également aux sciences humaines, à l'environnement.*

# VIRUS VITIFERA, OU L'EFFET PAPILLON *(PARTIE 2/2)*

*Publication du 25 octobre 2012*

Il faut savoir qu'avant les années cinquante, plus de la moitié du vignoble français est virosé (certains prétendent même que 80% du vignoble français est virosé à cet époque!). Les dommages causés par ces virus sont variables ; ils dépendent à la fois des virus, de la sensibilité des cépages et des conditions pédo-climatiques. Ils peuvent être extrêmement graves (perte des récoltes, altération de la qualité des raisins, baisse de la longévité des ceps). Quels sont ces virus ?

## LES VIRUS DE LA VIGNE

A ce jour, une cinquantaine de virus de la vigne ont été décrits et caractérisés dans le monde. On peut les répartir en quatre catégories :

- **Les virus responsables des maladies de dégénérescence et de dépérissement :** une douzaine de virus dans le monde appartenant au groupe des Népovirus, transmis par les nématodes du sol. La maladie type est le Court-Noué de la Vigne dont les Virus ArMV (Arabis Mosaic Virus) et GFLV (Grapevigne Fan Leaf Virus) sont les agents infectieux.

- **Les virus responsables de l'Enroulement Viral de la Vigne :** neuf virus décrits à ce jour, classés au sein des GLRaV (Grapevine Leaf Roll associated Viruses), appartenant aux groupes des Ampélovirus et des Clostérovirus. Ces virus sont transmis par les cochenilles.

- **Les virus associés au Complexe du Bois Strié.** On compte quatre affections distinctes : Rupestris Stem Pitting (Virus GRSPaV), Kobber Stem Grooving (Virus GVA), Corky Bark (Virus GVB) et LN33 Stem Grooving (Virus non encore mis en évidence).

- **Le virus de la Marbrure de la Vigne, GFKV** (Grapevine Fleck Virus). On ne lui connaît à ce jour aucun vecteur.
  Les virus sont des parasites acellulaires de très petite taille (20 nm à 1,2 µm), à structure moléculaire simple (un acide nucléique porteur de l'information génétique enveloppé dans une coque protéique).

Ce sont des parasites obligatoires qui utilisent la machinerie cellulaire de la plante hôte pour assurer leur multiplication. Les infections sont systémiques, c'est à dire que tous les organes de la plante contaminée sont envahis. Les virus se transmettent naturellement d'une plante à une autre par l'intermédiaire de vecteurs (vecteurs telluriques comme les nématodes pour les virus du Court-Noué, vecteurs aériens comme les cochenilles pour les Virus de l'Enroulement), mais ils se transmettent également mécaniquement par le greffage. Il n'existe aucun traitement curatif en cas d'infection virale. Les vignes contaminées restent infectées à vie.

## LA SÉLECTION CLONALE : UNE ARME CONTRE LES VIRUS

On comprendra alors aisément combien la sélection clonale a joué un rôle d'une extrême importance dans l'assainissement progressif du vignoble français en intégrant dans les critères de sélection du matériel l'absence de Virus. Cette approche de sélection sanitaire fut indispensable, et ce à double titre :

- le caractère non curable des infections virales entraîne leur maintien à vie sur les cultures pérennes que représente la viticulture.

- la transmission (naturelle ou artificielle par greffage) des virus d'une plante à l'autre ne peut qu'aggraver une situation infectieuse très forte.

## PÉPINIÉRISTES VITICOLES : GARANTIR DES PLANTS SAINS

A l'heure actuelle, les pépiniéristes viticoles doivent s'assurer du bon état sanitaire de leurs parcelles de vignes-mères de greffons et porte-greffes vis à vis de quatre virus : Virus du Court-Noué (ArMV et GFLV) et Virus de l'Enroulement de la Vigne (Type 1 (GLRaV-1) et Type 3 (GLRaV-3)). Les contrôles sont réalisés par test ELISA, à fréquences régulières, par un réseau de laboratoires agréés, sous la surveillance de la filière Bois et Plants de Vigne de France Agrimer.

Toutefois, on voit actuellement se développer de plus en plus des démarches de sélection clonale privée. Il s'agit de démarches volontaires, motivée par la crainte que la sélection officielle n'uniformise à outrance les cépages les plus cultivés et n'aboutisse à une diminution de la biodiversité de la vigne. Les acteurs de cette sélection clonale privée utilisent leur propre matériel viticole, généralement issu de parcelles anciennes à très anciennes (50 à 60 ans d'âge). Du fait de l'ancienneté de ce matériel végétal, le risque de prévalence viral est plus élevé, et les programmes analytiques dédiés à la recherche des virus débordent souvent du programme officiel, intégrant en plus des virus du Court-Noué et de l'Enroulement de la Vigne, le Virus de la Marbrure GFKV et les Virus associés au Complexe du Bois Strié (GVA, GVB).

Ces sélections clonales privées viennent compléter la sélection clonale officielle, en mettant l'accent sur la biodiversité, et aussi sur le maintien de la typicité des terroirs et du produit final. Elle constitue une approche intéressante de sélection variétale qui opère à la fois d'une sélection conservatrice et d'une sélection sanitaire.

Quoiqu'il en soit, la sélection variétale en viticulture est une affaire qui suit son cours...!

Nous entrons dans la période hivernale permettant la recherche de nombreux pathogènes présents sur la vigne. Le LCA propose une gamme complète d'analyses pour la détection des virus (ArMV, GFLV, différents type du GLRaV, GVA, GFKV.....), et, phytoplasmes tel que la Flavescence Dorée et le Bois Noir. Toutes ces prestations sont réalisées dans notre laboratoire de Blanquefort, accrédité COFRAC et Conventionné par le Ministère de l'Agriculture et de la Pèche.

# LE GÈNE DE LA PCR

*Publication du 22 mai 2014*

La PCR (Polymerase Chain Reaction) est une technique d'amplification génétique in vitro qui a été conçue au début des années 80 par un chercheur américain, Kary Mullis, travaillant au sein d'une firme biotechnologique californienne. Cette technique, qui a révolutionné les approches expérimentales en biologie moléculaire, a été publiée pour la première fois en 1985 dans la revue scientifique "Science". En 1993, Kary Mullis recevra le Prix Nobel de Chimie pour sa découverte de la PCR. Comme tout développement technologique nouveau, la PCR a d'abord été investiguée dans les domaines humains et vétérinaires. A partir des années 90, elle commence à être utilisée dans le domaine agricole. D'abord en tant qu'outil d'investigation pour la recherche fondamentale : étude et compréhension des génomes des plantes et organismes pathogènes, caractéristiques génétiques des variétés végétales. Puis en tant qu'outil dans le cadre des biotechnologies végétales de transformation (organismes génétiquement modifiés) et de sélection variétale. Enfin, dans le domaine du phyto-diagnostic (détection, identification et caractérisation des agents pathogènes des plantes), où sa puissance en termes de précision et de capacité de détection a permis la mise en place et le développement de tests extrêmement performants. Cet article de l'AgroReporter décrit la technique PCR et ses applications en agriculture.

## PRINCIPE DE LA PCR

La PCR est basée sur le mécanisme de réplication de l'ADN (1) in vivo : l'ADN bicaténaire est déroulé en ADN monocaténaire, puis dupliqué et ré-enroulé, selon des cycles répétitifs comprenant les trois étapes suivantes :

- Dénaturation de l'ADN par fusion à haute température pour convertir l'ADN bicaténaire en ADN monocaténaire. Cette étape est réalisée à une température comprise entre 93 et 96°C.
- Hybridation à l'ADN cible de deux oligonucléotides utilisés comme amorces. Cette hybridation a lieu à une température comprise entre 55 et 65°C.
- Extension de la chaine d'ADN par addition de nucléotides à partir des amorces en utilisant l'ADN polymérase (2) comme catalyseur en présence d'ions Mg2+. La température optimale de travail de l'ADN polymérase est de 72°C.

Trois étapes = Un cycle...

Les oligonucléotides sont de courtes séquences d'ADN monocaténaire qui sont différentes les unes des autres et complémentaires des sites de reconnaissance encadrant la séquence d'ADN à amplifier. Les étapes de dénaturation de la matrice d'ADN, d'hybridation des amorces et d'extension des amorces en brins complémentaires constituent un cycle dans la méthode PCR. Après chaque cycle, les brins d'ADN nouvellement synthétisés peuvent servir de matrice dans le cycle suivant. Au fur et à mesure des répétitions de cycles, il s'en suit ainsi une augmentation et une accumulation exponentielle des séquences d'ADN cible représentée dans la Figure 1.

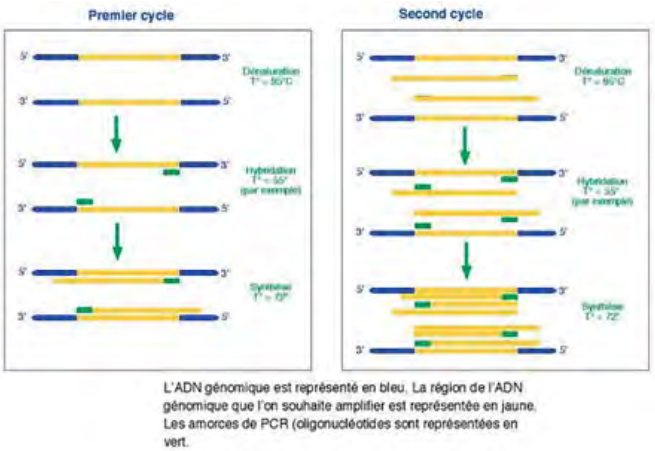

Premier cycle
Second cycle
L'ADN génomique est représenté en bleu. La région de l'ADN génomique que l'on souhaite amplifier est représentée en jaune. Les amorces de PCR (oligonucléotides sont représentées en vert.

*Figure 1 : Schéma représentant les cycles PCR*

## UNE PUISSANCE DE DÉTECTION INÉGALÉE...

L'amplification, en tant que nombre final de copies de la séquence cible, est exprimée par l'équation suivante : $(2^n-2n)x$

Avec : n = nombre de cycles ; 2n = premier produit obtenu après le premier cycle ; x = nombre de copies de la matrice originelle

Théoriquement, après 20 cycles PCR, en supposant une efficacité de 100% de la PCR, il y aura une amplification d'un facteur de la séquence d'ADN cible initiale, soit 1 048 576 copies de la matrice initiale. On comprend qu'on atteint là des sommets jusqu'alors inégalés en manière de puissance de détection ! Dans la pratique, on considère qu'un protocole PCR de 35 à 40 cycles d'amplification permet d'obtenir entre 100 000 et 1 000 000 de copies d'une séquence d'ADN cible.

## AUTOMATISATION

Deux progrès majeurs ont permis aux laboratoires d'automatiser le processus de la PCR :

- Le développement des blocs de température qui peuvent augmenter et abaisser rapidement leur température de matière automatisée et programmée : thermocyleurs ou machines PCR (chauffages et refroidissement par fluides, résistances électriques ou semi-conducteurs)
- Initialement, la méthode PCR utilise une ADN polymérase extraite de la bactérie E. Coli. Toutefois, cette enzyme est rendue inactive par les températures de l'étape de dénaturation, obligeant le rajout d'enzyme "fraîche" pour chaque cycle d'amplification. C'est finalement l'utilisation d'une enzyme thermostable dite "Taq Polymerase (3) , capable de supporter des températures supérieures à 90°C et utilisable en l'état pour la totalité des cycles d'amplification, qui a permis de simplifier et donc d'automatiser la réaction PCR

## PCR EN POINT FINAL / PCR EN TEMPS RÉEL

Dans la première génération des tests PCR, dite "PCR Classique" ou "PCR en point final", les produits d'amplification PCR sont analysés au stade terminal du processus analytique. Le contenu des tubes contenant le milieu réactionnel et l'ADN matrice sont déposés sur un gel d'agarose. Si la séquence d'ADN cible a été amplifiée, la quantité d'ADN copiée est en quantité suffisante pour être visualisée, après migration des molécules d'ADN dans un champ électrique, sous la forme d'une fluorescence UV. Cette approche ne permet toutefois d'obtenir que des résultats qualitatifs (réponse présence /absence de la séquence cible).

(...)

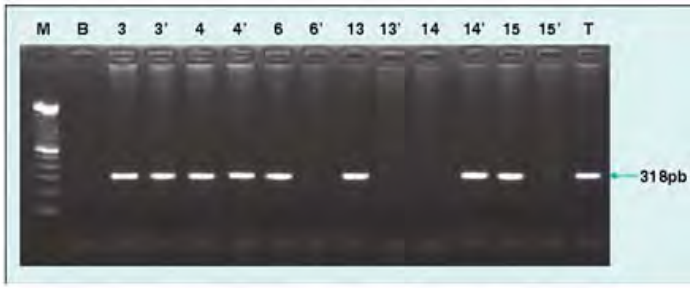



*Figure 2 : Visualisation de bandes d'ADN sur gel d'agarose*

A la fin des années 1990, une deuxième génération de tests PCR fait son apparition sous la forme d'un système qui permet de détecter le produit de la PCR au fur et à mesure qu'il s'accumule. C'est la "PCR en temps réel" dite également "PCR quantitative". L'accumulation des séquences d'ADN cible dans le milieu réactionnel se traduit par une augmentation d'une émission de fluorescence qui est détectée et quantifiée par l'intermédiaire d'une caméra CCD (Charge-Coupled Device). Ce système expérimental permet de suivre en temps réel, cycle par cycle, l'évolution de la réaction PCR. Elle permet en outre, à l'aide de témoins positifs et négatifs adaptés, d'opérer une quantification précise de la quantité d'ADN cible initialement présente dans l'échantillon analysé.

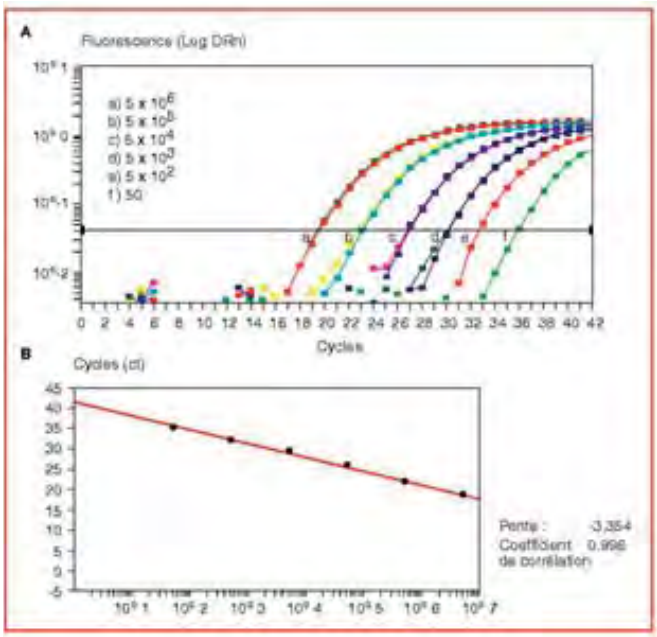



*Figure 3 : Schéma PCR en temps réel*

## APPLICATIONS DE LA PCR DANS LE DOMAINE AGRICOLE

Globalement, tous les pathogènes des plantes (bactéries, champignons, phytoplasmes, virus et viroïdes) sont susceptibles d'être appréhendés en terme de détection par l'intermédiaire de la technique PCR. La contrainte initiale est toutefois qu'il est nécessaire de disposer d'un minimum de connaissance de son génome pour développer les tests PCR. De même, selon la nature des agents pathogènes, le format de test PCR pourra varier sensiblement. Ainsi, pour les bactéries, champignons et phytoplasmes, dont le génome est constitué d'ADN double brin, les étapes de la PCR peuvent être menées directement à partir d'ADN total extrait du matériel végétal soupçonné d'être infecté. Dans le cas des virus et des viroïdes, dont le génome est constitué d'ARN monocaténaire, il est nécessaire d'ajouter une étape préliminaire au test PCR, la Réverse Transcription (RT) : l'ARN simple brin est transformé en ADN double brin par l'intermédiaire d'une enzyme, la Reverse Transcriptase, agissant sur l'ARN total extrait. On parle alors de test de type RT-PCR.

***Les applications de la PCR au diagnostic dans le domaine agricole sont nombreuses. Au laboratoire LCA, le développement et l'utilisation en routine des tests PCR pour la détection des agents pathogènes des plantes remonte à une quinzaine d'années. A ce jour, des prestations d'analyses PCR (PCR en point final et PCR en temps réel) sont proposées pour les Phytoplasmes des arbres fruitiers (Enroulement Chlorotique de l'Abricotier, Prolifération du Pommier et Déclin du Poirier), des plantes maraichères (Stolbur) et de la Vigne (Flavescence Dorée, Bois Noir). Des prestations d'analyses PCR en temps réel sont également proposées pour certains Champignons des céréales (Piétin Verse, Fusariose, Septoriose). Au-delà du phyto-diagnostic, la technique PCR commence à être utilisée par certains laboratoires spécialisés pour caractériser la diversité microbienne d'un sol et pour l'analyse fonctionnelle de ses populations. Elle ouvre ainsi une nouvelle voie dans la caractérisation et la compréhension du fonctionnement des sols…***

# PHYTOREPORTER

*Publication du 11 janvier 2013*

Les produits phytopharmaceutiques sont aussi appelés produits phytosanitaires par les professionnels ou pesticides par le grand public. Leurs principes actifs peuvent être d'origine naturelle ou synthétique. De natures très hétérogènes, ils se répartissent en un grand nombre de familles chimiques. Leur composition comporte par ailleurs des adjuvants inactifs du point de vue de l'action phytopharmaceutique elle-même, mais néanmoins nécessaires (conservateurs, mouillants, stabilisants…).

## POURQUOI S'INTÉRESSER AUX RÉSIDUS DE PESTICIDES ?

Les produits phytopharmaceutiques sont utilisés à titre préventif ou curatif dans le domaine de la protection des végétaux. Ils servent également aux traitements des voies ferrées et des espaces verts (désherbants et débrousaillants), des boiseries (fongicides et insecticides), des denrées alimentaires (traitements de conservation) , des animaux domestiques et de l'homme (poux et autres parasites). D'une manière générale, ils sont employés pour réduire les effets indésirables d'insectes (ravageurs des cultures, parasites), de champignons (agents pathogènes), voir d'autres végétaux (adventices), etc. Leur usage n'est donc pas limité qu'à l'agriculture, loin s'en faut : chacun d'entre nous, simple jardinier du dimanche, en apportant des anti-limaces ou de la bouillie bordelaise par exemple, utilise des produits phytosanitaires.

L'efficacité de ces substances est basée sur la toxicité des matières actives vis-à-vis des organismes pathogènes ciblés. Cette toxicité explique que la manipulation et le stockage de ces produits exigent des précautions, et que le législateur aie fixé des règles strictes pour minimiser leur impact sur la santé du consommateur final et sur l'environnement.

Dès leur application, les pesticides subissent des processus biotiques et abiotiques qui conduisent à leur dégradation plus ou moins complète, et de façon plus ou moins rapide selon les molécules. Une des principales dégradations est d'ordre physique (abiotique). C'est la photodécomposition. Elle résulte de l'effet des rayons ultraviolets composant la lumière naturelle sur les molécules chimiques photosensibles. Ce processus peut avoir lieu dans l'atmosphère, dans l'eau, à la surface du sol et des plantes. D'autres processus abiotiques ou biotiques existent et vont contribuer à cette dégradation des molécules. La présence de la matière active va donc diminuer entre la date d'application du traitement et la date à laquelle la denrée alimentaire est consommée.

Au final, le consommateur de fruit ne sera donc pas exposé à la dose complète de la matière active qui aura été appliquée lors du traitement au verger, mais seulement à ce qu'il reste au moment où il mange ce fruit : le ou les « résidus de pesticides ».Il est fondamental de souligner qu'avant d'être autorisé à être mis sur le marché par le ministère de l'agriculture (DGAL), un produit phytosanitaire fait l'objet de nombreuses études afin de s'assurer de son innocuité pour le consommateur (AMM : autorisation de mise sur le marché). Sur la base de ces études réglementaires, les autorités européennes fixent des limites maximales de résidus (LMR) autorisées dans les denrées alimentaires pour les matières actives autorisées à la mise sur le marché. Ces LMR sont désormais communes pour tous les membres de l'Union Européenne.

+ d'infos : *voir l'AgroReporter « LMR, ARfD, DJA et les autres » du 19/04/2012.*

## GARANTIR LA FIABILITÉ DES RÉSULTATS AU LABORATOIRE

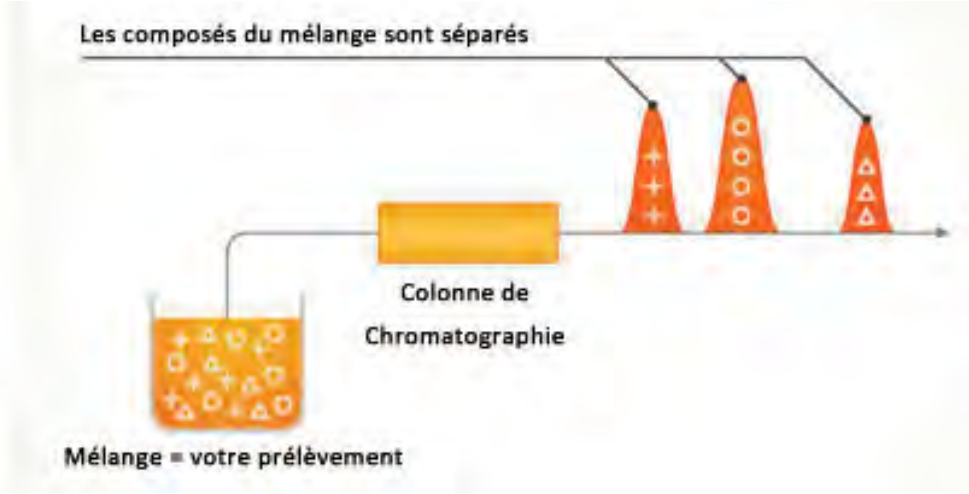
Un nombre important des matières actives est analysé en routine au laboratoire LCA afin d'en apprécier la teneur résiduelle dans les denrées alimentaires et vérifier la conformité de celles-ci vis à vis de la réglementation. Le laboratoire analyse depuis plusieurs années les pesticides dans des matrices variées. Ce type d'analyses est assez complexe. La diversité des familles de molécules (organochlorés, organophosphorés, pyréthrinoïdes, amides, amines, phenylurées, triazoles, carbamates, etc), la disparité des matrices analysées (végétaux, céréales, etc.. ), les risques d'interférences liés à ces matrices et les limites de détection de plus en plus basses devant être atteintes expliquent cette complexité.

L'analyse doit donc permettre d'identifier avec certitude et quantifier avec précision les composés recherchés. Pour ce faire, le laboratoire utilise des méthodes d'analyses extrêmement performantes basées sur la chromatographie gaz ou liquide couplée à la spectrométrie de masse. Cette association permet d'étudier des mélanges complexes tout en délivrant des résultats fiables :

[...]

[...]

- En amont, la chromatographie permet de séparer les composants chimiques d'un mélange par une différence d'affinité de ceux-ci entre la phase mobile (gaz ou liquide contenant l'échantillon à analyser) et la phase stationnaire (colonne chromatographique dans laquelle le gaz ou le liquide circule).




*Principe de la chromatographie*

- Ensuite, la spectrométrie de masse triple quadripôle est un mode de détection extrêmement sensible basé sur la sélection d'ions spécifiques pour chaque matière active recherchée. Son principe réside dans la séparation en phase gazeuse de molécules chargées (ions) en fonction de leur rapport masse/charge (m/z). La spectrométrie de masse appliquée aux composés minéraux, développée dans « Les atomes à la masse », paru le 22/11/2012, ne s'applique pas de la même façon aux molécules organiques.

Prenons le cas de la chromatographie en phase gazeuse : les molécules organiques préalablement séparées arrivent sous forme gazeuse dans la source d'ionisation et vont être bombardées par un faisceau d'électrons menant ces molécules dans un état excité. Ces entités instables vont casser un certain nombre de liaisons chimiques pour former des ions et des particules neutres. On va sélectionner des ions spécifiques à chaque molécule recherchée. L'ion précurseur sélectionné va être sélectionné dans le premier quadripôle sous l'influence d'un champ électrique avant d'être fragmenté en « ions produits » dans une chambre de collision remplie d'un gaz inerte et sous pression. Des ions spécifiques parmi les ions générés sont alors choisis sur le troisième quadripôle en fonction de leur rapport masse/charge par l'application d'un champ électrique puis ils sont collectés par le détecteur. L'ensemble des ions fragments, généralement 2 à 3 ions, permet l'identification et la quantification de la molécule d'intérêt.

La rapidité d'exécution de ces étapes permet d'analyser plusieurs matières actives dans un laps de temps très court. Ce qui a amené à développer des méthodes analytiques dites « multirésidus » qui permettent de doser plusieurs centaines de matières actives en une seule analyse.

La méthode utilisée au laboratoire est une méthode rapide, facile à mettre en oeuvre et robuste. C'est une méthode accréditée COFRAC et mise en place au laboratoire depuis 2005. Elle est basée sur une extraction initiale des pesticides à l'acétonitrile avec addition de sels pour séparer la phase organique de la phase aqueuse. La méthode d'extraction doit comporter peu d'étapes de manipulations d'échantillons afin d'éviter des pertes de matières active qui réduisent le rendement de l'extraction. Elle est suivie, si nécessaire, d'une étape de purification. Une aliquote est analysée respectivement en GC-MS/MS (chromatographie en phase gazeuse) ou/et en LC-MS/MS (chromatographie en phase liquide). Ainsi ces deux méthodes analytiques complémentaires permettent de doser un éventail conséquent de molécules à un seuil de quantification de 0.01 mg/kg pour la majeure partie des matières actives.

# LMR, ARFD, DJA ET LES AUTRES

*Publié le 19 avril 2012*

Depuis environs 50 ans, l'agriculture a été bouleversée par l'arrivée des traitements phytosanitaires. Et, conséquence directe, le contenu de notre assiette a changé également.
L'utilisation des engrais a modifié la composition chimique des plantes et leur qualité nutritionnelle, mais c'est la présence de résidus de produits de traitement qui mobilise le plus l'attention des nutritionnistes en se moment.Le vocabulaire de la sécurité alimentaire est riche d'abréviations incompréhensibles. Quelques explications sont nécessaires.

## LIMITE MAXIMALE EN RÉSIDUS

La Limite Maximale en Résidus (LMR) est la concentration maximale du résidu d'un produit phytosanitaire autorisé dans ou sur des denrées alimentaires, ou des aliments pour animaux.

Elle s'exprime en mg/kg frais et correspond toujours à un couple matière active / aliment.

Pour élaborer une LMR, 3 étapes distinctes sont nécessaires :

> **Définir un seuil de Bonnes Pratiques Agricoles «critique»** où le risque résidus est le plus important (dose/ha la plus élevée, délai de traitement avant récolte le plus court). Exemple : il faut 250 g / ha de la molécule X appliquée 3 semaines avant récolte pour être sûr qu'il n'y aura aucun risque jusqu'à la récolte.

**> Mettre en place des expérimentations résidus** respectant la bonne pratique agricole définie. Exemple : Dans les conditions décrites plus haut (250g/ha, 3 semaines avant la récolte), on mesure un résidu de N mg/kg de la molécule X. N mg/kg devient la LMR provisoire.

**> Calculer le risque pour le consommateur :** l'AJMT (Apport Journalier Maximum Théorique) est calculé en tenant compte de cette LMR provisoire. Il est défini comme la quantité maximale théorique d'une substance active donnée qu'un individu est susceptible d'ingérer quotidiennement tout au long de sa vie (en µg de substance active/ kg de poids corporel / jour). L'AJMT est une approche maximaliste de l'exposition car elle prend en compte une contamination systématique de l'ensemble des aliments au seuil réglementaire (LMR) (Source : Observatoire des Résidus de Pesticides).

Le calcul de l'AJMT permet de vérifier que le consommateur n'ingère pas une quantité de substance active supérieure à la Dose Journalière Admissible (DJA). Dans ce cas, la LMR provisoire devient la LMR définitive. Dans le cas contraire, on procède à une étude plus réaliste des doses absorbées. Si l'AJMT reste supérieure à la DJA, la commission peut refuser l'homologation de la molécule, ou demander une modification de la Bonne Pratique Agricole critique telle que la baisse des doses ou l'allongement du délai d'emploi avant récolte (DAR).

L'évaluation des risques des LMR revient à l'EFSA (Autorité Européenne pour la Sécurité Alimentaire), qui se prononce pour chaque nouvelle LMR. Désormais, les LMR sont harmonisées au niveau européen (Règlement CE n°396/2005, et actualisations disponibles par le Journal Officiel de l'Union Européenne).

## COMMENT SONT FIXÉES LA DJA ET L'AJMT

La DJA (ou ADI pour les anglais) est calculée à partir d'une dose sans effet observé (DSE) et d'un facteur de sécurité ou facteur d'Incertitude (FS ou FI), suite à une dose identique administrée quotidiennement à un animal cobaye.
Le Facteur de Sécurité tient compte de la variabilité intra et inter-espèce et de la nature des effets de la substance. Ce coefficient de sécurité varie de 100 (un facteur 10 pour le passage de l'animal à l'homme multiplié par un facteur 10 pour tenir compte des écarts de résistance entre individus) à 1000, selon la classification de la substance active.

Les DJA sont fixées soit par la Commission de l'union européenne. On parle de DJA pour les pesticides et de DJT pour les métaux lourds.

L'AJMT est calculé à partir des LMR par culture (en mg/kg) et de la part de la denrée. Suite à une enquête de consommation, on établit un régime alimentaire moyen quotidien du consommateur par exemple : 17 g de pomme + 8 g de carotte + 12 g de pomme de terre + 0,6 g de fraise etc.) ; on multiplie chaque quantité par la LMR établie pour la molécule étudiée et on fait la somme. On aboutit à un certain nombre de mg de substance absorbés-en théorie- par jour que l'on convertit ensuite en mg/kg de poids corporel/jour en divisant par le poids moyen du consommateur, 60 kg par exemple.

## AUTRES NIVEAUX DE RÉFÉRENCE UTILISÉS

**> L'Acute Reference Dose (ARfD), ou dose de référence aigüe,** désigne la quantité maximale de substance active qui peut être ingérée par le consommateur pendant une courte période (c'est-à-dire au cours d'un repas ou d'un jour, dans la nourriture ou l'eau de boisson), sans effet dangereux pour sa santé. Elle s'exprime en milligrammes de substance active par kilogramme de poids corporel.

Elle est calculée à partir d'une dose sans effet observé (DSE) fixée à partir d'études à court terme sur une espèce animale sensible et représentative, et d'un facteur de sécurité (FS). L' ARfD est fixée par la Commission de l'union européenne.

**> AOEL: Acceptable Operator Exposure Level (ou NEAO : Niveau d'Exposition Acceptable pour l'Opérateur).** Il désigne la quantité maximale de substance active á laquelle l'opérateur peut être exposé quotidiennement, sans effet dangereux pour sa santé. Il caractérise un indicateur de danger pour l'opérateur et le travailleur agricole. Il est comparé au niveau réel d'exposition qui est la somme de matière active absorbée par l'individu, soit à travers la peau (par contact direct ou à travers le vêtement), soit par inhalation.Il s'exprime en milligrammes de substance active par kilogrammes de poids corporel et par jour.

Les deux principaux indicateurs utilisés dans la profession sont la LMR et l'ARfd. Mais d'autres contaminants peuvent être recherchés : les métaux lourds, les mycotoxines, les résidus de médicaments vétérinaires…

Le laboratoire LCA réalise les analyses de résidus de produits phytosanitaires dans les denrées alimentaires et est accrédité depuis 2006 par le COFRAC sur le programme 99-2 (Analyses de contaminants chimiques chez les animaux, dans leurs produits et les denrées alimentaires destinées à l'homme ou aux animaux : résidus de pesticides). Dans le cadre des analyses qui nous sont confiées, nous sommes en mesure de vous fournir des rapports mentionnant les LMR..

# TECHNIQUE DE LABORATOIRE

EDITION COMPLETE

# LES PARTICULES ÉLÉMENTAIRES

*Publié le 13 janvier 2011*

La croûte terrestre est composée de 88 éléments naturels. Huit d'entre-eux, les éléments dits majeurs, représentent 99 % du total. Les éléments traces constituent le pourcent restant.

Ces éléments traces d'origine naturelle ou liée aux activités humaines, peuvent être potentiellement toxiques, notamment lorsqu'ils sont accumulés. L'évaluation de leurs niveaux de concentration dans l'environnement est donc nécessaire pour contrôler ou maintenir la qualité des sols, des produits organiques, des eaux et des rejets industriels... En matière d'environnement, différentes réglementations définissent des seuils de concentration garantissant une certaine innocuité des éléments traces métalliques.
Les enjeux environnementaux et économiques liés au dépassement de ces seuils pouvant être considérables, il est important que le contrôle de la conformité soit réalisé selon des méthodes analytiques robustes, sensibles et sélectives. Celles ci sont souvent normalisées.

Les méthodes de spectrométrie par couplage ICP-AES1 et ICP-MS² sont les plus employées dans le domaine de l'environnement, notamment en raison de leur rapidité, de leur sélectivité ainsi que de leur sensibilité.

Ces deux méthodes imposent que l'identification, la détection et le dosage des éléments traces soient réalisés sur une matrice liquide. Les échantillons solides demandent donc une étape préalable de mise en solution des éléments. Elle est réalisée par dissolution à l'aide d'acides (acide fluorhydrique, eau régale...), de mélanges oxydants, ou bien encore par extraction solide-liquide (lixiviation).

Les conditions de préparation de ces échantillons, broyage, mise en solution ont un rôle fondamental sur la pertinence des résultats. Nous y reviendrons dans un prochain Agro Reporter, mais dans ce numéro, parlons méthode de dosage !

## DOSAGE PAR ICP-AES

Cette technique de détection et de quantification, la plus couramment utilisée par les laboratoires, se base sur l'analyse des spectres d'émission des atomes. En effet, lorsque l'on apporte de l'énergie à un atome son état énergétique est modifié. Dès que l'excitation cesse, l'atome retrouve son état fondamental. Ce retour est caractérisé par la restitution de l'énergie reçue, lors de l'excitation initiale, sous la forme d'un rayonnement électromagnétique spécifique de l'atome considéré.

Lors d'une analyse par ICP-AES, un plasma de gaz rare (ICP), gaz ionisé mais électriquement neutre, est utilisé pour l'excitation des atomes.

## DOSAGE PAR ICP-MS

Cette technique d'identification et de dosage se base sur la masse des isotopes.

La première étape de l'analyse est identique à la précédente, ionisation des atomes consécutive à la traversée d'un plasma. La séparation des ions est effectuée, le plus fréquemment dans un filtre quadripolaire, en fonction de leurs rapports masse sur charge. Un détecteur traduit le flux d'ions perçu en courrant électrique, dont l'intensité est proportionnelle à la quantité d'ions détectée.

Actuellement, Afin de garantir la fiabilité de ses résultats, le Laboratoire LCA dose les métaux en ICP-AES, à l'exception du mercure, du sélénium et de l'arsenic, peu sensibles en ICP-AES qui sont dosés par fluorescence atomique dont la sensibilité est 10 à 100 fois supérieures.

Pour cette nouvelle année 2011, Le LCA a investit dans la toute dernière génération de ICP-MS. l'ensemble de ces dosages sera réalisé par ICP-MS sur toutes les matrices : eaux, sols, produits organiques ?

## LES AVANTAGES DE L'ICP-MS PAR RAPPORT À L'ICP-AES SONT :

- de meilleures sensibilités (meilleures LQ : Limites de Quantification)
- rapidité d'analyse accrue
- pas de possibilité d'interférences spectrales (du à la technique)

En contrepartie, il peut il y avoir une apparition d'interférences isobariques

*1 : Inductively Coupled Plasma - Atomic Emission Spectrometry*
*2 : Inductively Coupled Plasma - Mass Spectrometry*

# SPÉCIAL TECHNIQUE ANALYTIQUE : LES ATOMES À LA MASSE

*Publication du 22 novembre 2012*

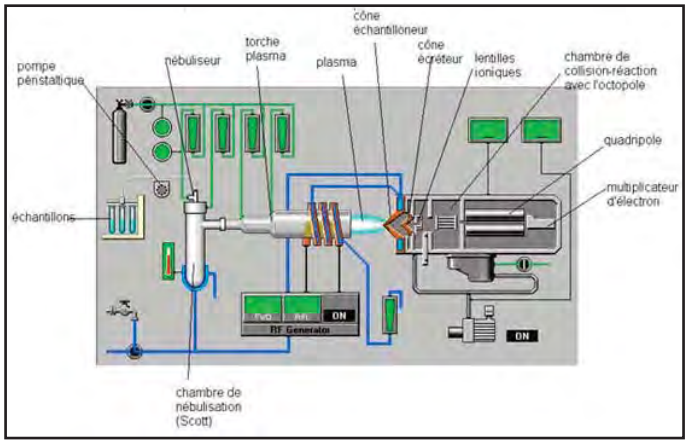
Cette semaine, l'AgroReporter a souhaité approfondir le sujet du dosage des éléments traces minéraux, abordé sous un angle généraliste dans Particules élémentaires du 13 janvier 2011.

Afin de pouvoir améliorer les limites de quantification (1) de ces éléments sur plusieurs matrices, le LCA s'est doté d'un ICP/MS (2) de la dernière génération. Ce système a été choisi car il possède un mode HMI (High Matrice Introduction) qui permet d'analyser des matrices dites « chargées », contenant plus de 2 g/L de sels dissous. Ces matrices chargées peuvent être des sols, des produits organiques, des eaux usées, des eaux saumâtres... Cette technique, qui permet de diluer l'échantillon sans trop dégrader les limites de quantification, est d'un grand intérêt lorsqu'il s'agit de doser des éléments en très faible concentration.

## POURQUOI L'ICP/MS

Grâce à cette technologie, le LCA va pouvoir proposer des limites de quantifications abaissées d'un facteur 10 environ (3) , sur les fruits et légumes, les grains, les vins, les eaux... Les résultats obtenus permettront d'apprécier la conformité des produits par rapport aux réglementations applicables dans le domaine alimentaire par exemple, ou de comparer des exportations d'ETM dans des grains ou des végétaux, que ne permettent par forcément d'autres technologies.

## PRINCIPE




## LES ÉLÉMENTS DOSÉS

Les éléments dosés en ICP/MS seront les suivants :

| Eléments | *Isotope* | Eléments | *Isotope* | Eléments | *Isotope* |
|---|---|---|---|---|---|
| Bore | *2* | Aluminium | *27* | Chrome | *52* |
| Manganèse | *55* | Fer | *56* | Cobalt | *59* |
| Nickel | *60* | Cuivre | *63* | Zinc | *65* |
| Arsenic | *75* | Sélénium | *78* | Molybdène | *95* |
| Cadmium | *111* | Antimoine | *121* | Baryum | *138* |
| Mercure | *201* | Mercure | *202* | Plomb | *208* |
| Sodium | *23* | Magnésium | *24* | Silicium | *29* |
| Phosphore | *31* | Soufre | *34* | Potassium | *39* |
| Calcium | *44* | | | | |

Le laboratoire pourra également doser des éléments un peu plus « exotiques », tels que :

| Eléments | *Isotope* | Eléments | *Isotope* | Eléments | *Isotope* |
|---|---|---|---|---|---|
| Lithium | *7* | Béryllium | *9* | Titane | *47* |
| Vanadium | *51* | Strontium | *88* | Zirconium | *90* |
| Argent | *107* | Etain | *118* | Tellure | *125* |
| Lanthane | *139* | Cérium | *140* | Tungstène | *182* |
| Thallium | *205* | Uranium | *238* | | |

Ce choix technologique s'inscrit dans les perspectives d'accréditations complémentaires du LCA.

Tous les échantillons sont minéralisés à l'aide d'acide (nitrique ou eau régale) afin de solubiliser les éléments à analyser. L'échantillon liquide est injecté dans le système par une aiguille de prélèvement automatique et entraîné par une pompe péristaltique jusqu'au nébuliseur.

Le nébuliseur concentrique va créer un aérosol, produit par la collision d'un flux d'argon avec la solution. Seules les gouttes suffisamment fines (<10 µm) sont introduites dans la torche à plasma, après le passage dans la chambre de nébulisation.

Au niveau de la torche, l'échantillon se mélange à un flux continu d'argon ionisé à haute température (environ 8000°K). Ce plasma sert à ioniser les éléments contenus dans la solution. Le potentiel d'ionisation élevé de l'argon (14.8 eV) permet l'ionisation totale de plus de 75% des éléments de la classification périodique (à l'exception des gaz rares, et de certains éléments tels que le chlore ou le fluor, à haut potentiel d'ionisation).

Le plasma arrive sur une interface composée de deux cônes successifs en platine : « l'échantillonneur », puis « l'écréteur » à travers lesquels les ions vont passer. Le faisceau d'ions va ensuite traverser des lentilles ioniques, qui modifient la trajectoire des particules chargées, afin d'éliminer les particules neutres.

Ensuite le faisceau d'ions traverse la chambre de collision-réaction octopolaire contenant de l'hélium qui va permettre d'éliminer une grande partie des ions poly-atomiques.

Puis le faisceau d'ions va traverser un spectromètre de masse. Celui-ci comporte un quadripôle à barreaux hyperboliques qui permet de sélectionner les isotopes désirés pour chaque élément à doser en fonction de leur rapport masse/charge. Ces ions vont être collectés à l'aide d'un détecteur, qui est un multiplicateur d'électrons à dynodes. Ce détecteur présente deux modes de fonctionnement : un mode à comptage d'impulsion pour les faibles concentrations et un mode analogique pour les fortes concentrations. Ainsi la gamme dynamique d'étalonnage peut être étendue, tout en minimisant le nombre de dilutions et en réduisant par conséquent l'incertitude de mesure.

---

*(1)- La Limite de Quantification (LQ) est la plus petite quantité d'un analyte qui peut être quantifiée avec un niveau de confiance donné. Cette notion est différente de celle de Limite de Détection (LD), qui correspond à la plus petite quantité d'analyte dont on puisse dire (avec un niveau de confiance donné) qu'il est présent dans l'échantillon. La LD est toujours inférieure à la LQ.*

*(2)- Inductively Coupled Plasma - Mass Spectrometry*

*(3)- Ordre de grandeur exprimé par rapport à l'ICP/AES, variable selon les éléments*

# LE DOSAGE MPO : QUI FAIT QUOI ?

*Publié le 14 octobre 2010*

MPO : MicroPolluants Organiques ou CTO : Composés Traces Organiques. Plusieurs réglementations sur les produits organiques (NF U 44-051, NF U 44-095, Arrêté du 08/01/1998…) imposent de respecter des teneurs limites en MPO (Micro-Polluants Organiques). Différentes méthodes sont proposées par les laboratoires pour doser ces composés… et elles ne donnent pas toutes la même fiabilité des résultats !
Petit tour d'horizon de l'existant.

## Principe de séparation des molécules

L'identification et la quantification des molécules se fait par un couplage chromatographe (pour la séparation des molécules)/détecteur (pour la quantification). Les systèmes de séparation principalement utilisés sont :

- HPLC (Chromatographie Liquide Haute-Performance)
- GC (Chromatographie Gazeuse)

Au cours de la séparation, les molécules sont entraînées par un gaz ou un liquide, en fonction de la technique employée. Cette « soupe » de molécules en mouvement entre en contact avec une phase stationnaire. En fonction de leurs affinités avec cette phase stationnaire, les molécules y seront retenues plus ou moins longtemps (temps de rétention). Ces techniques sont très performantes. Cependant deux molécules très différentes de celles recherchées peuvent avoir des affinités similaires pour la phase stationnaire. L'étape de détection et d'identification qui va suivre la chromatographie est donc cruciale pour l'obtention d'un résultat fiable.

## Identification/Détection/Dosage

**Principe :**

Différents types de détecteurs sont couplés aux chromatographes. Ils n'ont pas tous le même niveau de performance.

### Dosage des PBC

par GC/ECD (Electron Capture Detector)

Ce type de détecteur est peu spécifique. En effet, il est particulièrement sensible vis-à-vis des molécules contenant du chlore, ce qui est le cas des PCB…mais également de nombreuses autres molécules (pesticides, organochlorés par exemple). De plus on ne se base que sur le temps de rétention des molécules pour conclure sur la présence ou l'absence du PCB.
Compte tenu du fait qu'une molécule interférente puisse sortir en même temps que le PCB recherché, la quantité de « PCB » dosée peut être surestimée. Les laboratoires limitent ce problème en réalisant l'analyse sur deux colonnes de polarités différentes.

### Dosages des HAP

Par HPLC/Fluorescence :

Ici, les molécules sortant de l'HPLC sont excitées par des photons. L'analyse à la longueur d'onde d'émission des photons pour chaque molécule d'intérêt permet d'identifier cette famille de molécules dans le produit analysé. Comme précédemment, on ne se base que sur le temps de rétention des molécules lors de la chromatographie. Le problème de spécificité, et donc de surestimation de la quantité de HAP présente, persiste.
Cette technique est inadaptée pour l'analyse des matrices complexes, telles que les produits organiques et les boues.

### Dosage des MPO (PCB/HAP)

Par GC/MS (Mass Spectrometry):

Cette technique d'identification/dosage est actuellement la plus performante et la plus spécifique. Elle permet de traiter les HAP et des PCB selon une méthodologie commune.
En entrée du spectromètre, les MPO ainsi que les molécules interférentes, initialement neutres, sont ionisées. Parmi les ions ainsi générés, seuls ceux chargés positivement sont conservés et certains sont dosés. La spécificité de cette technique est basée sur le fait que lors de l'ionisation, la molécule donne un spectre d'ions caractéristique parmi lequel on choisi un nombre restreint d'ion pour quantifier les molécules d'intérêt. Par rapport aux autres techniques, celle-ci permet donc de différentier, avec une certaine précision, deux molécules qui auraient les mêmes temps de rétention GC.

Par GC/MS/MS (spectrométrie de masse en tandem) :

L'utilisation de cette méthode de dosage augmente encore la robustesse des résultats obtenus. Le principe est strictement identique à celui de la GC/MS, mais complété d'une seconde étape de fragmentation. Certains ions spécifiques des MPO générés lors de l'ionisation, qualifiés d' « ions parents » sont accélérés. Une collision avec un gaz inerte est provoquée générant ainsi des « ions fils » spécifiques. Ce sont certains ions de ces derniers qui serviront à l'identification et à la quantification des MPO présents

La doublette : ion parent issu de la première ionisation + ions fils issus de la deuxième ionisation permet une grande spécificité dans l'identification des MPO. Cette dernière étant optimisée, le dosage est par conséquent plus fiable et tout risque de surestimation du résultat est fortement limité.

**Cette technique garantissant les résultats les plus fiables est celle mise en œuvre au Laboratoire LCA.**

# DOSSIER CLASSÉ X

*Publication du 14 mars 2013*

Il ne s'agit pas du dernier roman à la mode : en chimie, le « X » peut désigner un atome électronégatif lié à un atome de carbone. On rencontre ce type de liaison avec des éléments de la famille des halogènes par exemple. Dédié aux composés organohalogénés, cet article de l'AgroReporter s'intéresse à l'origine, naturelle ou humaine, de ces molécules peu biodégradables et souvent toxiques, à leur quantification et aux valeurs limites de référence dans la réglementation

## NATURE ET ORIGINE DES ORGANOHALOGÉNÉS

Les composés organohalogénés sont des substances chimiques organiques qui contiennent une ou plusieurs liaisons entre le carbone et un halogène (chlore, brome, fluor, iode). Ils peuvent être issus d'une synthèse industrielle mais il existe aussi des organohalogénés d'origine naturelle. Pour preuve, on estime que la mer dégage naturellement environ 5 millions de tonnes par an d'un gaz chloré dérivé du méthane, le chlorométhane ; c'est un gaz très inflammable et toxique. Il est principalement issus de processus biologiques processus biologiques qui se produisent dans les océans et par la combustion de la biomasse.
Le tétrachlorure de carbone, utilisé couramment comme agent dégraissant industriel et nettoyant domestique, et le trichlorométhane, utilisé comme anesthésiant et comme produit pharmaceutique, sont aussi produits en grandes quantités par les rhodophycées, des algues rouges très répandues dans les océans. La production naturelle de tétrachlorure de carbone a été estimée à près de deux millions de tonnes par année, bien plus que ce qui est produit par l'industrie. De plus on a estimé que la quantité d'organochlorés entièrement naturels est comparable à ce qui est produit par l'industrie. Tout ce chlore vient, très naturellement du sel (NaCl) des océans.

Représentation moléculaire d'un pesticide organochloré (le Chlordécone)

Certains organohalogénés sont fabriqués industriellement et commercialisés sous forme de produits aussi divers que des produits phytosanitaires (aldrine, dieldrine, lindane, ...), des plastiques (PVC, polychloroprène, ...), des solvants (perchloréthylène, trichloréthylène,...), des lubrifiants, des gaz réfrigérants ou propulseurs (hydrochloro-fluorocarbures, hydro-fluorocarbures), des produits pharmaceutiques, des diélectriques dans les condensateurs, des additifs dans les peintures et les encres, etc. Dans l'industrie française, plus de 95% du chlore sert à fabriquer des dérivés organochlorés, dont 35% pour la seule préparation du chlorure de vinyle.

Des composés organochlorés sont également formés non pas à partir d'un processus volontaire de fabrication mais en tant que sous-produits. L'hypochlorite de sodium par exemple (eau de javel) réagit avec la matière organique présente dans une eau résiduaire et peut aboutir à la formation de composés organochlorés volatiles toxiques. Les secteurs industriels susceptibles d'être concernés sont divers et les substances en cause parfois mal identifiées. On peut notamment citer les secteurs du recyclage de câbles électriques (lors du brûlage du revêtement isolant en PVC) ou de la pâte à papier (blanchiment au chlore).

## DEVENIR DANS L'ENVIRONNEMENT

Fabriqués et utilisés depuis les années 40, les pesticides organochlorés dits "de première génération", comme le DDT, sont aujourd'hui strictement interdits dans toute l'Europe et dans de nombreux autres pays industrialisés. Tous ces composés sont aujourd'hui considérés comme des polluants organiques persistants.

Lorsque les organochlorés pénètrent dans l'environnement aquatique, leur comportement dépend de leurs propriétés physiques

• Certains sont particulièrement volatils et ont tendance à rejoindre l'atmosphère. Parmi ceux-ci, des substances telles que le tétrachlorure de carbone, le bromure de méthyle, le 1,1,1-trichlorométhane, les composés chlorofluorocarbonés (CFC) ou hydrochlorofluorocarbonés (HCFC), les halons (composés bromés). Ils constituent souvent une menace pour la couche d'ozone stratosphérique. Les plus connus, les CFC, ont également une contribution significative à l'effet de serre, reconnue dès 1987 par les Nations Unies. Aujourd'hui, leur production et leur consommation font l'objet d'une interdiction internationale. En effet, gaz à effet de serre, ces molécules participent au réchauffement de la planète car ils possèdent une étonnante capacité à retenir la chaleur. De surcroît et bien que présents à l'état de simples traces, ils peuvent entrer en réaction avec l'ozone atmosphérique, qu'ils détruisent. On considère que leur emploi massif notamment dans les systèmes de réfrigération et comme gaz propulseur dans les bombes aérosols est en bonne partie responsable du «trou de la couche d'ozone».

• D'autres, de type composés halogénés tels que, par exemple, les polychlorobiphényles (PCB), le DDT, l'hexachlorobenzène (HCB) ou la dieldrine, sont moins volatils. Ils sont difficilement biodégradables et ont tendance à se fixer dans les sédiments ou à « remonter » les chaînes alimentaires. Pour la plupart, les organochlorés sont lipophiles : ils se dissolvent plus facilement dans les graisses et les huiles que dans l'eau. Ils ont donc tendance à s'accumuler dans les tissus adipeux des organismes vivants, provoquant parfois par surdose, la mort des consommateurs terminaux. Enfin, certains insectes ont développé une résistance contre ces insecticides, obligeant ainsi les producteurs agricoles à accroître les doses, augmentant par là même la pollution.

De nombreuses études ont montré la très lente biodégradabilité de ces composés, une stabilité chimique remarquable pour la majeure partie d'entre eux et donc leur persistance à long terme dans l'environnement (on en retrouve dans les glaces antarctiques). On comprend donc que, malgré des restrictions à l'utilisation et malgré leur interdiction depuis plusieurs dizaines d'années, on puisse encore en détecter.

## AOX, EOX, POX

Analyseur d'AOX – Exemple : Model AOX-200 de Mitsubishi Chemical Analytech

Comme on l'a vu, les organohalogénés constituent une famille vaste de composés ayant des propriétés environnementales diversifiées et dont l'appréciation exige de ce fait une approche substance par substance. Le plus souvent il est difficile, très coûteux, et donc en pratique impossible, de doser tous les contaminants d'un échantillon.

Une façon peu onéreuse et rapide de connaître le niveau de contamination globale d'un échantillon par les composés organohalogénés est de doser la quantité d' halogènes.

Cette méthode d'analyse consiste à briser les liaisons entre le carbone et les atomes d'halogène pour former des halogénures, chargés négativement, qui pourront facilement être dosés en présence d'atomes d'argent chargés positivement. Cette méthode permet de connaître la quantité globale de chlore, de brome et d'iode mais ne permet pas de doser le fluor.

[...]

[...]
Par l'intermédiaire d'extractions spécifiques, on distingue trois types de composés organohalogénés :

• EXTRACTIBLES (EOX) : l'extraction consiste à extraire une partie des composés organohalogénés par un solvant et de les doser par la méthode décrite précédemment. Il faut que ces composés aient une affinité pour le solvant utilisé pour pouvoir être extrait de l'échantillon.

• PURGEABLES (POX) : l'extraction consiste à déplacer les composés organohalogénés volatils par un barbotage avec un gaz et de les dos par la suite.

• ADSORBABLES (AOX) : l'extraction est faite en présence de charbon actif sous agitation. Les composés organohalogénés sont piégés sur le charbon actif. La filtration de l'échantillon permet de calciner le charbon actif dans un four sous oxygène libérant ainsi les halogénures et permettant leur dosage. Le dosage des AOX permet de s'approcher le plus près possible de la quantité totale des composés organohalogénés contenus dans l'échantillon.
Le dosage des AOX est la méthode par excellence qui permet, en peu de temps et à moindre frais, de donner une information sur le niveau de contamination par les composés organohalogénés.

Il existe des normes pour le dosage des AOX dans différentes matrices, on peut citer la norme NF EN ISO 9562 pour le dosage des AOX dans l'eau et la norme NF EN 16166 pour les boues, biodéchets et sols.

## VALEURS MESURÉES DANS L'EAU

Cet indicateur global est très souvent utilisé à des fins réglementaires dans différents contextes, surtout dans celui des Agences de l'Eau. Avec les indicateurs METOX (métaux et métalloïdes) (1) et Matières inhibitrices (2), les AOX permettent aux Agences de calculer le montant des redevances à destination des industriels pour cause de « pollution toxique ». (3)

Pour l'Agence de l'eau Adour Garonne par exemple, la redevance liée aux émission d'AOX n'est perçue que pour des rejets annuels supérieurs à 50 kg/an (concentration en AOX * débit journalier) . Cette même agence a fixé un montant unitaire de 0.85 €/kg d'AOX rejetés par an pour tout flux annuel supérieur à 50 kg.

Le suivi des AOX dans les rejets industriels permet également un contrôle indirect des rejets de substances organohalogénées dans le milieu naturel. Si les teneurs en AOX tendent à augmenter et à dépasser des valeurs limites de rejets, une investigation est menée avec des analyses par famille de composés organohalogénés afin d'identifier précisément la source ou le process à l'origine de cette contamination.

L'arrêté du 2 février 1998 relatif aux prélèvements et à la consommation d'eau, ainsi qu'aux émissions de toute nature des installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE) soumises à autorisation, fixe une valeur seuil à 1 mg/l et pour des rejets supérieurs à 30g/j. La limite de quantification sur ce paramètre est de 0.01 mg/l.

## QUID DES BOUES D'ÉPURATION

Compte-tenu de la faible biodégradation de ces composés, la question du devenir des AOX dans les boues d'épuration peut se poser, même si la réglementation relative à l'épandage agricole des boues ne mentionne pas ces composés. Signalons que les réglementations allemande et suisse, de leur côté, ont fixé des valeurs limites ou indicatives en AOX, de 500 mg / kg de matière sèche, pour l'épandage agricole. La France, elle, a pris le parti d'identifier et de quantifier certains organochlorés : les PCB.

Les données françaises sur les teneurs en AOX ou EOX dans les boues sont rares. Citons une campagne d'analyses menée en 1994 (4) sur 50 stations de taille variée, incluant des stations avec industries raccordées : la teneur médiane en EOX mesurée était de 15,5 mg Cl/kg.

Une étude rapportée par l'Agence de l'eau Artois-Picardie (Guide Technique : « Quand les toxiques se jettent à l'eau… ») montre que les mesures réalisées sur 200 stations d'épuration, représentant 75 % de la capacité du bassin, ne font pas apparaître de différence significative des flux d'AOX, ramenés à l'habitant, dans les grosses collectivités et dans les petites communes supposées avoir moins d'activités économiques. Les AOX des eaux urbaines semblent donc provenir majoritairement des particuliers (utilisation de solvants chlorés et de produits domestiques du type " eau de javel "qui en réaction avec la matière organique génèrent des sous-produits chlorés). Le rendement des stations d'épuration biologiques sur les composés organohalogénés est faible (33%) et il s'agit vraisemblablement en grande partie d'un transfert vers l'atmosphère.

**Résultats des mesures des paramètres redevances pour les stations d'épuration collectives**

| Pollution | MI K équitox/j | AOX kg/j | Métox kg/j |
|---|---|---|---|
| Pollution totale entrée stations dont industries raccordées | 1 800 | 210 | 700 |
| Pollution sortie stations | 90 | 140 | 220 |

*Source : Guide technique « Quand les toxiques se jettent à l'eau.... » (AEAP)*

*On voit donc que la prise en compte des produits de type organohalogénés est une nécessité dès que l'on s'intéresse à l'environnement. Le laboratoire LCA réalise les mesures des AOX dans les eaux et les produits organiques. N'hésitez pas à nous contacter.*

## CONTACT ET INFORMATIONS

**>** *contact@laboratoirelca.com*

*(1) METOX : Indice global calculé à partir des concentrations en métaux et métalloïdes, pondérées par des coefficients multiplicateurs en fonction de leur degré de toxicité, (en métox/jour pour les rejets). Source: d'après Agence de l'eau Adour-Garonne*

*(2) Matières inhibitrices : polluant des eaux, minéral ou organique, ayant une toxicité suffisante pour inhiber le développement et/ou l'activité des organismes aquatiques. L'unité de mesure est l'équitox (eq) et le kiloéquitox (keq ou ket). Source: d'après François Ramade (écologue)*

*(3) Pollution par des substances à risque toxique qui peuvent, en fonction de leur teneur, affecter gravement et/ou durablement les organismes vivants. Ces substances peuvent conduire à une mort différée ou immédiate, à des troubles de reproduction, ou à un dérèglement significatif des fonctions biologiques (troubles de reproduction, par exemple). Les principaux toxiques rencontrés dans l'environnement lors des pollutions chroniques ou aiguës sont généralement des métaux lourds (plomb, mercure, cadmium, zinc,...), des halogènes (chlore, brome, fluor, iode), des molécules organiques complexes d'origine synthétique (pesticides,...) ou naturelle (hydrocarbures). Source: d'après Ministère chargé de l'environnement et Onema*

*(4) CSHPF, 1998. Risques sanitaires liés aux boues d'épuration des eaux usées urbaines*

# HYDROCARBURES : LE VRAI VISAGE DES FOSSILES

*Publié le 13 mars 2014*

Il est en des hydrocarbures comme de certains éléments traces minéraux : s'ils ont au départ une origine naturelle, leur présence dans l'environnement peut être un indicateur d'une pollution anthropique. Ajoutez une certaine toxicité pour l'écosystème et l'homme, et vous comprendrez pourquoi l'analyse des hydrocarbures fait partie des paramètres de contrôle de différents déchets destinés à retourner dans l'environnement. Cet article de l'AgroReporter fait le point sur la nature et l'origine de ces composés organiques, les différentes techniques analytiques existantes (et leur signification) et l'utilisation des résultats d'analyses dans les sols (pollués), les sédiments, les déchets et les eaux.

## La grande famille des hydrocarbures

«Hydrocarbure » est un terme générique qui correspond en fait à une grande famille de composés regroupant des produits aussi différents que le pétrole brut, le pétrole raffiné, le kérosène, les essences, fuel, gasoil, lubrifiants, huiles à moteurs, ...

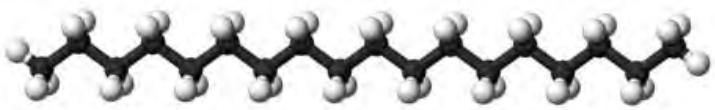
Ils peuvent être d'origine naturelle ou synthétique. La principale source d'hydrocarbures naturels est constituée par des ressources fossiles telles que le pétrole et le gaz naturel. Ils proviennent de la décomposition d'une grande quantité de matière organique coincée entre deux couches sédimentaires. Cette décomposition n'a pu se faire que dans des contextes géologiques passés très spécifiques, ce qui explique la faible quantité de ressources disponibles.

*Formation du gaz naturel et du pétrole (animation).*

Les hydrocarbures peuvent être présents dans le milieu naturel : dans les sols, dans les eaux, dans des boues ou les sédiments. Ils proviennent généralement de pollutions pétrolières (production, raffinage, transport, stockage et utilisation de produits pétroliers), générées par des accidents (cuves percées, accidents poids lourds), ou bien par des fuites (stations services, entrepôts, …). Ils peuvent également être issus de la pétrochimie, d'usines à gaz, de l'industrie chimique de base, de la fabrication du caoutchouc ou des industries mécaniques. Dans l'eau, ils ne sont pas ou peu solubles. Ils peuvent être à l'état de surnageant (pour les moins denses), à l'état d'émulsion ou bien de dépôt de fond (pour les plus denses).

Les hydrocarbures sont composés d'atomes de carbone et d'hydrogène. On peut les classer selon l'organisation de leurs atomes de carbone :

- **Les alcanes** sont constitués de chaînes linéaires ou ramifiées comprenant au minimum 5 atomes de carbone. Leur point d'ébullition (passage à l'état de gaz) se situe entre 35 °C et 490 °C. Ils ne sont donc généralement pas volatils à la température ambiante.



*Représentation 3D d'un alcane (octadécane : C18H38). Les sphères noires représentent les atomes de carbone, et les sphères blanches les atomes d'hydrogène.*

- **Les hydrocarbures aromatiques monocycliques** (benzène, toluène, éthylbenzène, xylènes, …) ou polycycliques (HAP).

Plus un hydrocarbure présente un nombre d'atomes de carbone élevé, plus il est qualifié de « lourd ». Le poids moléculaire est directement lié au nombre d'atomes de carbones présents. Les hydrocarbures volatils (solvants), sont généralement constitués d'un mélange d'hydrocarbures présentant un faible nombre de carbones. Les hydrocarbures lourds (fuels, huiles) présentent à l'inverse un mélange de molécules présentant un poids moléculaire élevé, avec un nombre de carbone plus élevé.

Les hydrocarbures aliphatiques sont constitués d'une chaîne carbonée linéaire saturée. Ce sont les composants principaux des gaz de combustion (gaz naturel et gaz de pétrole liquéfié), essence et huile de moteur. La toxicité de ces composés est inférieure à celle des HAP et, une fois émis dans l'environnement, ils sont plus sensibles aux phénomènes d'altération et persistent donc moins dans le milieu. Cependant, les flux de composés aliphatiques observés sont plus importants que ceux des composés aromatiques.

## Les hydrocarbures au laboratoire

L'analyse des hydrocarbures se fera différemment selon que l'échantillon est solide ou liquide.

| Nombre de Carbones | Volatil | Nom | Utilisation actuelle |
|---|---|---|---|
| C1 | Gaz | Méthane | Gazier : distribué (chauffage, énergie, chimie) |
| C2 | Gaz | Ethane | Gazier : distribué (chauffage, énergie, chimie) |
| C3 | Gaz | Propane | GPL |
| C4 | Gaz | Butane | GPL |
| C5-C7 | Oui | Naphtas | Pétrochimie |
| C5-C10 (1) | Liquide | Essence | Carburants ; solvants |
| C9-C20 (1) | Liquide | Kérosène Gas-oil | Carburant, chauffage |
| C12-C20 (1) | Liquide | Huiles | Lubrifiants |
| C14-C26 (1) | non | Gas-oil lourd | Chauffage, production électrique, moteurs industriels |
| C20-C40 (2) | non | Goudron | Revêtements routiers et couverture, étanchéité, protection |

*Nature et utilisation des hydrocarbures. Source : BRGM (2001)*

### • Matrices solides

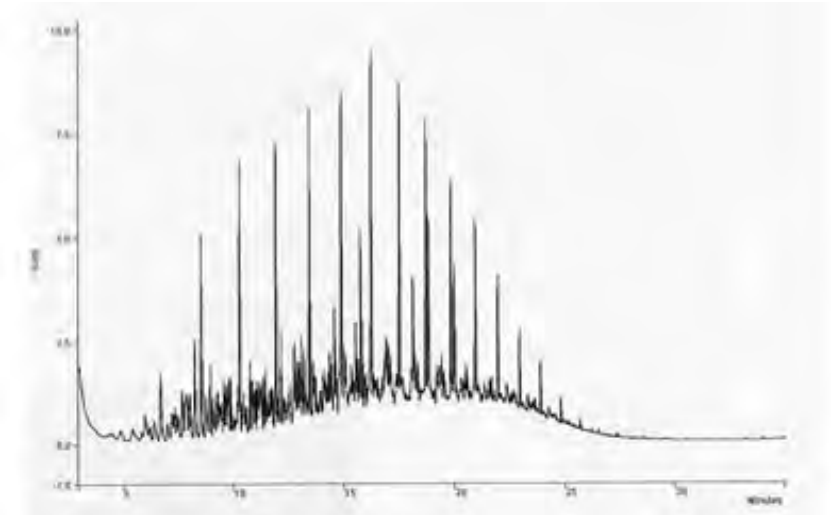
Sur les matrices solides, on utilise un solvant apolaire, l'hexane (C6H14), pour extraire les hydrocarbures présents dans le support (sol, boue, déchet). Le dosage, après purification de l'extrait, se pratique par chromatographie en phase gazeuse avec détection par ionisation de flamme (FID). Cette méthode est applicable lorsque la teneur en hydrocarbures est comprise entre 100 et 10 000 mg/kg sec. Elle permet de quantifier tous les hydrocarbures ayant une plage d'ébullition comprise entre environ 175 °C et 525 °C. Elle permet de doser par exemple les n-alcanes de C10H22 à C40H82, les iso-alcanes, les cyclo-alcanes, les alkyl-benzènes, les alkylnaphthalènes et les composés aromatiques polycycliques dans la mesure où ils ne sont pas adsorbés sur la colonne de purification. Les résultats sont exprimés en concentration en huiles minérales C10-C40, en mg/kg de MS.

Il faut souligner que cette méthode présente une limite : elle n'est adaptée qu'à la quantification des hydrocarbures comprenant 10 à 40 atomes de carbone (du n décane au n-tétracontane), c'est-à-dire des hydrocarbures peu volatils de type fuels et gasoil, et des hydrocarbures plus lourds de type huiles de coupe, lubrifiants, huiles de vidanges et goudrons. Elle ne permet pas de quantifier les hydrocarbures volatils (essences). Dans les matrices solides, pour apprécier la présence d'hydrocarbures volatils, il est préconisé d'analyser les solvants aromatiques (BTEX).

(...)

(...)
Le passage de l'extrait dans le chromatographe permet d'obtenir un chromatogramme. On compare le chromatogramme obtenu à celui d'un étalon afin d'en déduire la concentration en hydrocarbures.
Il existe deux normes sur matrices solides basées sur le principe analytique exposé ci-dessus :
- NF EN 14039, dosage des hydrocarbures sur déchets
- NF EN ISO 16703, dosage des hydrocarbures dans les sols.

**• Les hydrocarbures dans l'eau**
Dans les matrices liquides, le même solvant, l'hexane, est utilisé pour réaliser l'extraction des hydrocarbures présents. L'extraction est directement réalisée dans le flacon qui contient l'échantillon, afin d'extraire l'ensemble des hydrocarbures présents. Le dosage en GC/FID permet d'obtenir l'indice hydrocarbure, correspondant à la quantification des composés en C10 à C40 (norme NF EN ISO 9377-2).
Contrairement aux matrices solides, il existe une méthode permettant de doser les hydrocarbures volatils à chaîne courte (C5 à C11) dans les eaux : l'indice hydrocarbures volatils. La technique analytique est proche de celle de l'indice hydrocarbure (chromatographie phase gaz/ détecteur FID). Le cumul des résultats de l'analyse de l'indice hydrocarbure C10-C40 avec celui de l'indice hydrocarbures volatils (C5-C11) permet d'obtenir les hydrocarbures totaux.



*Chromatogramme d'un mélange d'hydrocarbures.*
(profil d'un gas-oil par chromatographie en phase gazeuse avec détection par ionisation de flamme : les composants sont formés de chaînes carbonées de longueurs comprises entre 10 et 24 carbones).

*Exemple de chromatogramme*

## Utilisation des résultats

Il existe plusieurs textes réglementaires, pour différentes matrices en fonction de leur destination, dans lesquels sont fixées des concentrations maximales en hydrocarbures. L'analyse des hydrocarbures répond donc souvent à un besoin réglementaire. On peut citer notamment :

- *L'arrêté du 09/08/2006* relatif aux niveaux à prendre en compte lors d'une analyse de rejet de rejet dans les eaux de surface ou de sédiments marins, estuariens ou extraits de cours d'eau ou de canaux, mentionnant des concentrations maximales situées entre 0,1 et 0,5 kg/jour

- *L'arrêté du 28/10/2010* relatif aux critères d'admission des déchets inertes en centre de stockage (classe III), fixant une valeur maximale de 500 mg/kg sec pour les hydrocarbures C10-C40,

- *L'arrêté du 03/04/2000* relatif à l'industrie papetière, avec des valeurs maximales de rejet dans les eaux de surface de 10 mg/l d'hydrocarbures totaux si le rejet dépasse 100 g/j. Lorsque le flux total de 10 kg/j est dépassé, l'exploitant réalise les mesures de suivi sur ses effluents aqueux, avec un prélèvement asservi au débit, qu'ils soient rejetés dans le milieu naturel ou dans un réseau de raccordement à une station d'épuration collective. Dans le cas d'un rejet dans le milieu naturel, l'étude peut s'étendre aux eaux de surface et/ou sédiments et/ou faune et flore aquatique.
Plus d'information sur la mesure de débit : (re)lire l'article de l'AgroReporter « Le débit de l'eau » du 27/02/2014.

Les techniques d'analyses des hydrocarbures peuvent aussi être utilisées comme outil d'investigation performant dans le milieu naturel. Elles permettent de quantifier les hydrocarbures mais également de les qualifier en comparant les chromatogrammes obtenus à des étalons d'hydrocarbures standards (huiles, gazole, paraffines, …). Chaque type d'hydrocarbure présente un profil chromatographique spécifique. Cette caractéristique est intéressante, notamment dans le cadre de recherche de pollutions au sein d'un réseau d'assainissement par exemple. On parle couramment d'empreinte hydrocarbure. Il est donc possible pour le laboratoire de procéder à des analyses tout au long du réseau et de s'assurer que les hydrocarbures détectés présentent le même profil et qu'ils sont donc issus de la même source polluante.

***Le laboratoire LCA réalise les déterminations des huiles minérales C10-C40 dans les matrices solides et pâteuses, et des hydrocarbures volatils ainsi que l'indice hydrocarbure C10-C40 dans les eaux. Il est également en mesure d'effectuer le prélèvement de vos échantillons. N'hésitez pas à nous contacter !***

# TECHNIQUE DE LABORATOIRE : LA COLORIMÉTRIE

*Publié le 21 avril 2011*

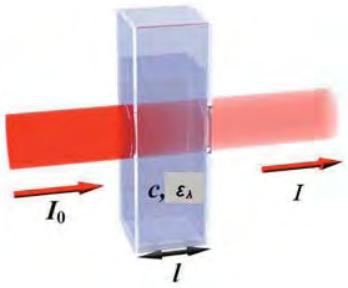
Dosage par colorimétrie »…. Cette méthode de dosage est couramment utilisée pour quantifier par exemple les ions nitrite, nitrate, ammonium, phosphate, chlorure, chromate (dans le cas de l'analyse du carbone des sols). Présentation de ce grand classique des techniques de laboratoire.

## PRINCIPE

Le dosage colorimétrique repose sur la quantification de produits colorés, issus d'une réaction chimique. Elle n'est possible que lorsque l'intensité de la coloration est proportionnelle à la concentration de l'élément à doser. Les dosages colorimétriques s'appuient sur la loi de Lambert-Beer, exprimée par la relation suivante :

$$A_\lambda = -\log \frac{I}{I_0} = \varepsilon_\lambda \cdot \ell \cdot C.$$

**I / I0** est la transmittance de la solution (sans unité).
**A** est l'absorbance ou densité optique à une longueur d'onde λ (sans unité).
**e** est l'absorptivité molaire (aussi appelé coefficient d'extinction molaire), exprimée en L·mol-1·cm-1. Elle dépend de la longueur d'onde, la nature chimique de l'entité et la température.
**l** est la longueur du trajet optique dans la solution traversée, elle correspond à l'épaisseur de la cuve utilisée (en cm).
**C** est la concentration molaire de la solution (en mol.L-1) et correspond à la valeur à déterminer.
Cette équation est très utile pour la chimie analytique. En effet, si **l** et **e** sont connus, la concentration d'une substance peut être déduite de la quantité de lumière transmise par elle.
Les exceptions à cette loi peuvent être liées soit à la nature du système chimique, soit aux performances de l'appareil de mesure. La lumière utilisée doit être monochromatique.




## MATÉRIEL

D'une façon générale, un colorimètre se compose :

- d'une source de lumière d'intensité variable ;
- d'un dispositif optique pour focalisation et orientation de la lumière ;
- d'un dispositif permettant la séparation et l'isolement des différentes radiations extérieures
- d'un dispositif de mesure de l'énergie lumineuse à l'entrée ;
- d'un dispositif de mesure de l'énergie lumineuse à la sortie de la cuve.

## SOLUTION EXAMINÉE

Les réactions chimiques utilisées en colorimétrie sont souvent délicates ou instables ; des variations de coloration, des troubles, peuvent limiter la précision de la méthode. C'est pourquoi le dosage colorimétrique doit respecter certaines précautions :

- vérifier la stabilité de la substance colorée en fonction de la lumière et de l'oxydation à l'air ;
- maintenir une température constante dans la pièce ;
- lorsque la densité optique évolue en fonction du temps, opérer lorsque la coloration est stabilisée et avant son affaiblissement éventuel ;
- vérifier l'absence de substances donnant des colorations parasites, ou adapter la méthode dans ce cas. Par exemple : adaptation de la longueur d'onde et emploi d' « essais à blanc » ;
- filtrer préalablement les solutions turbides ou contenant de fines particules ;
- éliminer les ions gênants pour qu'ils soient transparents dans la zone de la longueur d'onde. Par exemple : utilisation de l'oxydoréduction, modification du pH, formation de complexes ;
- attention aux réactions incomplètes ou réversibles qui conduisent à sous-estimer la concentration de l'élément.

## LA COLORIMÉTRIE EN FLUX CONTINU

Les laboratoires utilisent aujourd'hui des colorimètres en flux continu. La cuve est remplacée par une cuve à circulation. Elle se présente comme un petit tube capillaire positionné devant le capteur optique. Une veine de liquide, segmentée par des bulles d'air et composée des produits et des réactifs, passe dans ce tube. Ce système rend automatiques les opérations manuelles de la colorimétrie classique.
Le principal avantage de la méthode est qu'elle permet des cadences analytiques élevées dues à l'automatisation. A ceci s'ajoute un faible coût du consommable.
En revanche, le flux est un process long à s'équilibrer. Il faut compter en général 30 à 45 minutes avant le début de l'analyse, pour un ion donné. Cette technique est donc réservée à des séries d'échantillons importantes, comportant la même demande analytique.
Enfin on peut noter que la colorimétrie en flux continu est un peu moins sensible que la spectrocolorimétrie, qui a une bande passante plus faible.

## LES ALTERNATIVES AU FLUX CONTINU

D'autres techniques permettent de doser les mêmes analytiques que le flux continue. On peut notamment citer :

- **Le flux séquentiel :** a peu près similaire au flux continu. Seul le système d'injection de l'échantillon diffère.
- **La chromatographie ionique** : le principe de dosage n'est plus colorimétrique mais cette méthode permet elle aussi d'identifier et de quantifier les ions. Plus longue, elle présente l'avantage de doser plusieurs ions dans le même process.

**Le saviez-vous ?**

**LES AGREMENTS**

Les agréments de nos laboratoires sont annuels. Ils peuvent être décernés par un Ministère sur la base d'une accréditation : c'est le cas des analyses de terres avec le Ministère de l'Agriculture (MAAPRAT). Mais ils peuvent être décernés suite à une évaluation complémentaire, effectuée lors de l'audit COFRAC par l'un des auditeurs, spécialement mandaté, qui rédigera un rapport spécifique : c'est le cas pour les analyses d'EAUX et de SEDIMENTS. C'est dans ce cadre que notre laboratoire de La Rochelle a obtenu l'agrément du Ministère de l'Environnement (MEDDAAT) le 21/02/2011.

# MESURER, C'EST COMPARER…

*Publié le 16 juin 2011*

« Mesurer, c'est comparer une grandeur physique inconnue à une référence dont la traçabilité est établie dans le Système international d'unités, qui met à profit les effets nouveaux de la physique fondamentale » (Marc HIMBERT, Conservatoire National des Arts et Métiers, chaire de Métrologie).

## A QUOI SERT LA MÉTROLOGIE

Le métier d'un laboratoire est avant tout de mesurer. Pour garantir la valeur juste d'un résultat, il faut en premier lieu disposer d'un outil adapté, fiable et contrôlé. A ce titre, les laboratoires effectuent des contrôles de métrologie. Celle-ci est « la science des mesurages [1] et des applications ». Elle comprend tous les aspects théoriques et pratiques des mesurages, quels que soient l'incertitude de mesure et le domaine d'application. Cette discipline est apparue et s'est développée pour répondre à un besoin d'uniformisation et de diffusion des systèmes de mesure.

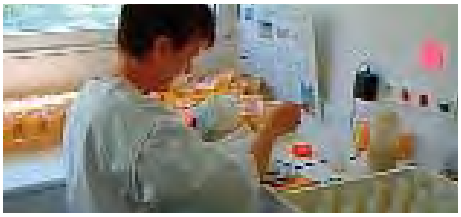
En effet, jusqu'à la fin du 18ème siècle, les mesures étaient d'une extrême diversité. Des mesures de même nature et de valeurs voisines avaient des appellations différentes selon les provinces, voire les villes ou les villages d'une même région. A l'inverse, le contenu physique de mesures de même nom différait en général selon les lieux et aussi selon la corporation intéressée ou l'objet mesuré. Ainsi le boisseau, ancienne unité de mesure du volume des grains, valait-il 13 litres à Paris et 78,808 litres à Bordeaux…

Les noms des anciennes mesures étaient, dans toutes leurs variantes, souvent très imagés, et attachés soit aux dimensions de l'homme (pied, pouce,…), soit à ses aptitudes (journal : étendue de terre travaillée en un jour, galopin : quantité (variable !) de vin que l'on peut boire pendant un repas …) ou à des facteurs naturels (picotin : ration d'un cheval (3,2 litres d'avoine),…). Quoiqu'il en soit, au XVIIIème siècle, la multiplicité des mesures n'ayant entre elles aucun facteur commun était extrêmement génante, notamment dans les activités administratives, commerciales et scientifiques (source :site Industrie Gouv).

Ce sont des scientifiques français, inspirés par la Révolution française et par l'esprit des Lumières, qui ont conçu un système de référence basé sur des objets ayant la même valeur pour tous. Le texte fondateur, toujours à la base de nos systèmes de mesure est la loi du 18 germinal an III (17/04/1795). Il instaure l'usage du mètre, du litre, dont les premiers étalons ont été conçus à cette époque, ainsi que le système décimal encore en usage aujourd'hui.

## LA MÉTROLOGIE LÉGALE

C'est la métrologie pratiquée dans les laboratoires. Elle s'applique aux mesurages, aux unités de mesure, aux instruments de mesure et aux méthodes de mesure.



Elle inclut quatre activités principales :

> l'établissement des exigences légales (par exemple : vérification du volume distribué par les pompes à essence),

> le contrôle / évaluation de la conformité de produits et d'activités réglementés (par exemple : étalonnage des radars de contrôle de vitesse),

> la supervision des produits et des activités réglementés, la mise en place d'infrastructures nécessaires à la traçabilité des mesures réglementaires et des instruments de mesure (par exemple : vérification et étalonnage des balances des commerçants).

**Exigée au laboratoire**

Au LCA, nous considérons que tout doit être mis en œuvre pour assurer la fiabilité du résultat. L'accréditation de nos laboratoires par le COFRAC valide l'efficacité de nos processus métrologiques. Ceci est d'autant plus important que les valeurs mesurées peuvent conditionner la conformité réglementaire d'un produit.

Dans notre domaine, les risques peuvent être de déclarer conformes des produits dont une ou plusieurs valeurs dépassent les limites autorisées (micro-polluants des boues, agents pathogènes des composts, résidus de pesticides des végétaux destinés à la consommation humaine, ….), ou à l'inverse de déclarer non-conformes des produits qui satisferaient les critères fixés par la réglementation. Pour le laboratoire, les implications se situent à de nombreux postes : contrôle de la température (étuves, salles de dosages, fours, …), vérification des balances, contrôles de volumes (pipettes, …), utilisation de matériaux de référence certifiés [2] pour l'étalonnage [3] des instruments de dosage…

L'objectif final de la métrologie est donc de donner un résultat de mesure :

- Fiable, en tenant compte de l'incertitude découlant de toutes les étapes que subit l'échantillon dans le process analytique,
- Qui corresponde au besoin en matière de maîtrise des risques liés aux erreurs de mesure et à leurs conséquences.

## LA MÉTROLOGIE AU LCA

**Les pesées :**

> Matériel concerné : balances analytiques.

> Fréquence de contrôle :
  - Quotidien : avant chaque utilisation, avec une « masse de travail »,
  - Hebdomadaire : le premier jour de la semaine, avec différents poids étalons[4] (eux-mêmes étalonnés tous les 5 ans), sur toute l'étendue de la balance,
  - 2 / an : contrôle par le fournisseur et par l'Assistante Métrologie du laboratoire.

> Vérification de la justesse [5] et de la fidélité [6] par des masses étalonnées certifiées Cofrac.

**Les températures :**

> Matériel concerné : toutes les enceintes thermostatées du laboratoire (étuves, réfrigérateurs, armoires thermostatées, autoclaves, …).

> Fréquence de contrôle : continue. Enregistrement par des sondes reliées à un logiciel. Les sondes sont vérifiées tous les ans à l'aide d'un thermomètre étalonné Cofrac.

> Etablissement d'une cartographie (1/an/enceinte). On met 9 sondes de température dans l'étuve, par exemple, pour vérifier l'homogénéité de la température dans toute l'enceinte.

**Les volumes :**

> Matériel concerné : pipettes automatiques, distributeurs automatiques, …

> Fréquence de contrôle : trimestrielle.

> Modalités : différents volumes sont testés.

**Les dosages :**

> Matériel concerné : tous les appareils de dosage.

> Fréquence de contrôle : adaptée à l'appareil.

> Modalités : étalonnage à partir de solutions de référence certifiées (fournies avec les certificats d'étalonnage).

Les résultats des vérifications métrologiques sont comparés aux écarts maximaux tolérés (EMT).

*[1] Mesurage : action de mesurer. Du mesurage découle la mesure (= la grandeur).*
*[2] Étalonnage : ensemble des opérations établissant, dans des conditions spécifiées, la relation entre les valeurs indiquées par un appareil de mesure et les valeurs connues correspondantes d'une grandeur mesurée.*
*[3] Matériau de référence : matériau ou substance dont une ou plusieurs valeur(s) de la (des) propriété(s) est (sont) suffisamment homogène(s) et bien définie(s) pour permettre de l'utiliser pour l'étalonnage d'un appareil, l'évaluation d'une méthode de mesurage ou l'attribution de valeurs aux matériaux.*
*[4]Étalon : matérialisation d'une grandeur donnée dont on connaît la valeur avec une grande exactitude. Un étalon sert à étalonner d'autres étalons ou équipements qui mesurent la même grandeur.*
*[5]Justesse : écart par rapport à la valeur « vraie ». Les résultats doivent être les plus proches possibles de cette valeur.*
*[6]Fidélité : un équipement fidèle donne des résultats identiques pour une série de mesures consécutives.*

# COMPARAISON INTER-LABORATOIRE

*Publié le 10 février 2011*

Il arrive qu'on soit amené à consulter les résultats d'analyses obtenus par deux laboratoires différents pour un même produit. Les écarts parfois observés sont difficiles à interpréter sans information préalable. Dans l'Agro-Reporter de cette semaine, qui vient compléter notre article du 19/11/2010 sur les incertitudes de mesure, nous vous apportons des éléments d'explication et tentons de vous donner une marche à suivre pour pouvoir exploiter ces résultats.
La valeur affichée sur un rapport d'analyse et son incertitude de mesure, sont la conséquence de toutes les étapes que l'échantillon aura suivies depuis le prélèvement sur le terrain jusqu'au dosage dans le laboratoire.
Les facteurs d'influence d'un résultat analytique se concentrent au niveau de trois grandes phases du processus :

**• L'échantillonnage :**

C'est une étape capitale. Les quantités reçues au laboratoire sont souvent très faibles au regard du volume total de produit qu'elles représentent :
une parcelle de plusieurs hectares, un lot de plusieurs centaines de tonnes de compost, un rejet sur 24 heures d'une station d'épuration…
L'échantillon qui arrive au laboratoire doit être représentatif du lot analysé. Il existe différentes stratégies de prélèvement selon la nature de la matrice et sa taille. Elles sont décrites dans des normes [1] ou dans des arrêtés.

Mais les principe généraux sont analogues : plusieurs points de prélèvements puis mélange (suivi éventuellement d'un " quartage ") et homogénéisation pour les matrices solides ou pâteuses (terres, produits organiques, substrats, végétaux), prélèvements asservis au temps ou au débit pour les eaux. Le conditionnement et le transport doivent être appropriés de façon à ne pas altérer l'échantillon.

**• La préparation :**

Cette étape consiste à rendre possible l'analyse de l'élément recherché. Elle doit permettre de rendre des résultats qui sont le reflet le plus fidèle de ce qu'il y a dans l'échantillon reçu au laboratoire. Elle peut être plus ou moins complexe et doit être optimisée au mieux pour réduire les sources d'incertitude d'une mesure.
La préparation peut se réduire à une simple filtration (par exemple : dosage des anions dans une eau par chromatographie ionique) ou exiger une succession de procédures (séchage, broyage, extraction, purification, évaporation, etc…).

Chacune de ces étapes va amener une contribution à l'incertitude de mesure et des modes de préparation différents peuvent expliquer des écarts importants entre deux résultats (par exemple : méthodes d'extraction de micropolluants organiques dans des boues comme l'extraction au soxhlet, l'extraction sous pression et haute température, l'extraction aux ultrasons ; etc…). Des normes décrivent la préparation de l'échantillon à effectuer par le laboratoire en fonction des déterminations analytiques demandées.

**• L'analyse :**

Cette étape consiste le plus souvent à quantifier l'analyte (molécule, ion, …) dans la matrice. Elle peut faire appel à des appareils aux performances différentes selon les concentrations recherchées et les matrices étudiées.

L'incertitude de mesure calculée par le laboratoire tient compte des étapes de préparation et d'analyse. Elle dépend du paramètre mesuré, de la nature de la matrice et de la valeur elle-même. Les laboratoires sont tenus de tenir les incertitudes de mesure à disposition de leurs clients.

## COMMENT COMPARER DES RESULTATS ENTRE LABORATOIRES ?

La comparaison des résultats de deux laboratoires ne peut se faire que si l'étape d'échantillonnage est identique.

Dans la pratique, il faut envoyer à chaque laboratoire une partie obtenue par « quartage » d'un échantillon déjà homogène. Il faut également que les prestataires comparés appliquent les mêmes méthodes analytiques (préparation, extraction, dosage).

Ensuite les résultats des deux laboratoires ne peuvent être considérés comme différents que si la condition suivante n'est pas satisfaite :

$$\Delta = |m_1 - m_2| \leq \sqrt{(U_1^2 + U_2^2)}$$

avec : m1 : résultat du laboratoire 1
m2 : résultat du laboratoire 2
U1 : incertitude du laboratoire 1
U2 : incertitude du laboratoire 2

**• Pour aller plus loin :**

Les essais inter-laboratoires sont un indicateur de l'aptitude d'un laboratoire à rendre des résultats comparables à ceux de la profession.

Les résultats de ces essais inter-laboratoires (intercomparaisons) sont ensuite exploités en interne dans le laboratoire pour établir des cartes de contrôles. Ce sont ces cartes qui vous garantissent la justesse de votre prestataire d'analyses, n'hésitez pas à les demander. Quasiment jamais dévoilées par les laboratoires, le LCA vous donne un aperçu de ses cartes.

*[1] Exemples de normes relatives à l'échantillonnage :*
*- ISO 10381 parties -1 (2002), -2 (2002), -4 (2003),-6 (2009) pour les sols,*
*- NF EN 12579 (2000) pour les amendements organiques et les supports de culture,*
*- NF EN ISO 5667 partie 12 (1995) et 13 (1998) pour les sédiments et les boues*
*- NF EN ISO 5667-1 (2007) pour les eaux*
*- NF EN14899 (2005) pour les déchets ménagers,*

# RELATION CLIENT AU LABORATOIRE LCA

L'AGRO reporter

EDITION COMPLETE

# IN THE BOX

*Publié le 29 septembre 2011*

*Le prélèvement, le conditionnement et l'envoi de vos échantillons sont des phases clefs pour avoir des résultats de qualité. La nature de vos produits et les déterminations souhaitées déterminent le type d'emballage à demander au laboratoire ainsi que le mode de transport à privilégier. De plus en plus complexe et technique, la prise de commande et l'envoi des fournitures sont aujourd'hui organisés comme un service à part entière. Plus de 50 000 flacons sont envoyés chaque année et ce nombre est en constante augmentation ! Focus sur l'un des points forts de ce Service : la gestion de commandes planifiées…*

## ANTICIPATION = SIMPLIFICATION

Nous avons constaté que la demande de fournitures pour obtenir le flaconnage adapté se faisait souvent au moment où le besoin se présentait... Ce caractère d'urgence est amplifié par le délai incompressible nécessaire à l'acheminement des emballages à l'adresse du destinataire. A une époque où « tout doit aller vite », nous sommes tous à la recherche des moyens d'optimiser notre temps.

Le LCA a donc conçu depuis plus d'un an un logiciel de gestion de fournitures planifiées à l'attention de ses clients. Le principe est assez simple : soit à partir des statistiques de vos envois d'échantillons de l'année passée, soit selon un planning théorique, nous établissons ensemble une livraison automatique de fournitures, cadencée par mois ou sur une autre période. Notre équipe logistique vous garantit une livraison fractionnée et automatique de vos fournitures, entre le 1er et 5 de chaque mois, adaptée au type d'échantillon que vous nous confiez. Inutile donc de vous préoccuper de vos stocks, le LCA le prend en charge pour votre compte. Cette livraison automatique connait un très fort succès et il nous a semblé important de faire connaître à chacun ce service (gratuit !) qu'offre le LCA.

## FLEXIBILITÉ

Pour autant, cette rotation n'est que théorique et vous pouvez à tout moment moduler les quantités que nous devrions vous livrer. Nous sommes aussi toujours à votre écoute pour répondre à toutes demandes ponctuelles. Dans ce cas le circuit reste inchangé.

***Plus d'infos sur la logistique LCA :***

***contactez Guillaume HALLEY au service Logistique fournitures@laboratoirelca.com ou au 05 46 43 45 74.***

# AD LIBIDUM* *Conformément à la volonté de la personne, en latin moderne

*Publié le 9 février 2012*

Une prise de sang sans ordonnance d'analyses médicales n'a pas de sens, n'est-ce pas ? L'ordonnance n'est pas une simple feuille de papier, c'est le trait d'union entre votre demande et le laboratoire.... Dans nos métiers, qu'il s'agisse du « bordereau de demande d'analyse » ou de la « fiche de renseignements » (le vocabulaire varie selon les laboratoires), qu'ils soient « papiers » ou « électroniques », ces documents font figure de prescription. Ils sont l'objet d'une attention particulière à la réception des échantillons, à l'occasion d'une « revue des demandes » quotidienne.

## QUIS, QUID, QUOMODO (1) ...

Tout d'abord, la fiche de renseignements permet le rattachement du produit reçu (l'échantillon physique) à un client et son identification. L'objectif est aussi de vérifier que le laboratoire a les compétence sur le type de produit à analyser, et éventuellement de réorienter l'échantillon vers un autre laboratoire. Comme un ophtalmologiste renverrait un patient vers un cardiologue pour un électrocardiogramme...
Ces informations sont primordiales, elles vont permettre par la suite d'orienter l'échantillon dans le circuit analytique adapté (identifié par une numérotation spécifique) et d'éditer les résultats sur le rapport d'analyse correspondant.

## BIEN CONNAÎTRE LE PRODUIT POUR BIEN L'ANALYSER ET L'INTERPRÉTER

La fiche de renseignements peut sembler fastidieuse à remplir : type de produit (nature et référence), cahier des charges, etc...
Ces informations vont pourtant servir dans différentes étapes :

> **Référence de l'échantillon** : elle est mentionnée sur le rapport d'analyse et vous permet d'identifier l'échantillon, surtout dans le cas d'envois groupés de résultats.

> **Nature de l'échantillon :** elle permet d'identifier si les déterminations seront réalisables sous accréditation par le laboratoire.

> **Cahier des charges :** celui-ci nous permet de faire apparaître sur les rapports, les valeurs des seuils de conformité qui vous concernent, en regard des résultats d'analyses. Exemples de cahiers des charges pour les produits organiques : arrêté du 8 Janvier 1998, norme NF U44-095, norme NF U44-051 (en précisant les dénominations de type).

> **Adéquation** des déterminations ou d'une batterie de déterminations en fonction de la matrice. Chaque détermination se fait selon une norme analytique, qui peut varier selon la nature de l'échantillon. Par exemple, pour le pH (potentiel hydrogène) :
- boues et sédiments : NFU 12176
- terres : NF ISO 10390
- supports de culture : NF EN 13037

Il est important de bien spécifier la ou les analyses à réaliser ou simplement de faire référence à un devis réalisé, préalablement, en accord avec un chargé d'affaire.
Ce document tient lieu de contrat. Il peut comporter éventuellement des options (analyse en urgence, interprétation), ou toute.

## IZILAB, L'EASY LAB

IZILAB est une application WEB mise gratuitement à disposition des clients du LCA pour dématérialiser leurs commandes d'analyses. Elle se positionne comme un outil complémentaire des nombreux logiciels du LCA, qui offrent un accès aux résultats à tout moment, autorisent le téléchargement des rapports « pdf » via l'espace client, toutes ces informations étant également accessibles par IPHONE (par notre application IZIPHONE). L'interface IZILAB permet au client de suivre l'avancement de ses échantillons, de recevoir en retour des résultats au format « pdf », EDI-LABO (Sandre), de conserver l'historique de ses commandes... Cette interface permet également une économie de temps et de papier mais surtout de fiabiliser les échanges entre le laboratoire et ses clients.

**Les fonctionnalités principales sont :**

- génération des commandes au format EDI-LABO sur les matrices eaux, boues, terres et composts
- édition des fiches de renseignements à joindre aux échantillons
- paramétrage et personnalisation de l'espace client (agences, services, stations, points de prélèvement, affaires,...)
- suivi des commandes (projets de commandes, commandes en cours, commandes soldées, ...)
- historique des résultats et téléchargements aux formats pdf, SANDRE, xml, ...

## ANALYSE SOUS CONDITIONS

La préparation des échantillons pour analyse peut démarrer à réception du colis. La faisabilité de l'analyse aura été vérifiée au préalable, et le demandeur averti en cas de problème (flacon cassé, produit refusé...). Comme celui qui ne se présenterait pas à jeun pour une mesure de la glycémie ! De même, la « revue des demandes » permet d'identifier les échantillons pour lesquels les résultats devront être accompagnés d'une phrase de réserve, car certaines déterminations peuvent évoluer dans le temps ou nécessitent un conditionnement spécifique.

Par exemple, pour les analyses « microbiologiques », une condition de réserve sur le résultat d'analyse est appliquée :

- si la date de prélèvement est supérieure à 48h à réception au laboratoire ,
- et/ou si l'échantillon n'a pas été envoyé en flacon aseptique,
- et/ou si l'échantillon n'a pas été envoyé en glacière réfrigérée.

Les envois pour les analyses de microbiologie sont donc à éviter les jeudis et vendredis.

## PRÉCAUTIONS D'USAGE

La demande client ne peut pas être dissociée de l'échantillon. Celui-ci doit être clairement référencé de la même manière que sur la fiche, pour que lors de la réception du colis le laboratoire puisse l'identifier sans souci. Il est important de veiller à envoyer l'échantillon en quantité suffisante. Cela permettra de réaliser l'ensemble de la demande et, à tout moment du processus, de conserver la possibilité de revenir sur l'échantillon d'origine. C'est une obligation du laboratoire de conserver une partie de l'échantillon en cas de contrôle interne ou de réclamation client, traçabilité oblige.
A savoir : les quantités d'échantillon sont imposées par les protocoles d'analyse. Certaines déterminations sont plus gourmandes que d'autres. Par exemple : pour les inertes, il faut au minimum 2 kg sur le brut (soit 4 litres environ pour des composts).

Les quantités d'échantillons à fournir sont indiquées au verso des Fiches de Renseignements et dans le Guide du prélèvement du laboratoire.

## CONDITION SINE QUA NON DE VOTRE SATISFACTION

La satisfaction du client est l'une des principales préoccupations du laboratoire. Un manque de précision sur les données, la demande d'analyse, ou une quantité insuffisante pour l'analyse vont forcément entraîner un retard dans le traitement de l'échantillon.
Le délai d'analyse ne pourra être garanti que si la demande est complète :
→ fiche de renseignements/bon de commande /devis rempli avec précision et signé,
ET
→ accompagné de l'échantillon référencé représentatif du lot en quantité suffisante pour analyse.
C'est le binôme gagnant pour que le laboratoire puisse réaliser les analyses dans les meilleures conditions.

# BIEN RAPPORTER

*Publication du 11 avril 2013*

A l'heure où le LCA lance sa nouvelle gamme de rapports WikiReport, levons le voile sur les rapports d'analyses des laboratoires. Il faut savoir que les laboratoires accrédités par le COFRAC ne sont pas totalement libres dans leur manière de présenter les résultats d'analyses. Certaines informations sont obligatoires, d'autres mentions sont facultatives et certains affichages sont interdits. L'AgroReporter fait le point sur ce que doit, peut, ou ne doit pas, comporter un rapport d'analyses.

Le rapport d'analyses est la réponse du laboratoire à la demande d'analyse de son client. La première fonction du rapport sera donc de présenter, de façon lisible, tous les renseignements administratifs tels que les coordonnées du demandeur, l'identification de l'échantillon, les données géographiques ou d'origine, ainsi que les résultats des mesures demandées. Au niveau du laboratoire, ces informations et la cohérence avec la demande analytique sont contrôlées avant le démarrage des analyses, à la réception des échantillons lors d'une « revue de demandes ».

Parfois, le rapport d'analyses va apporter des informations complémentaires, pour faciliter la lecture ou la compréhension des résultats : c'est le cas pour les analyses de terre, avec le positionnement des seuils d'impasse pour le phosphore et le potassium par exemple, ou pour les analyses de boues avec l'affichage des valeurs limites réglementaires.

Pour les laboratoires accrédités par le comité français d'accréditation (COFRAC), des règles strictes s'appliquent au rendu des résultats, et par conséquent au rapport d'analyses. Elles sont édictées par la norme NF EN ISO/CEI 17025, qui régit l'accréditation par le COFRAC, et dans le référentiel COFRAC GEN REF 11 (pour la gestion du logo COFRAC).
Le COFRAC, la norme NF EN ISO/CEI 17025 et les étapes de l'accréditation ont été détaillés dans l'article « Le LCA accrédité Cofrac jusqu'en 2016 (…) » de l'AgroReporter du 24 février 2011, consultable ici.

Ainsi, certaines informations doivent être impérativement présentes sur les rapports, notamment :

> Des mentions relatives au laboratoire : nom, adresse…

> Des mentions relatives au client : nom, adresse…

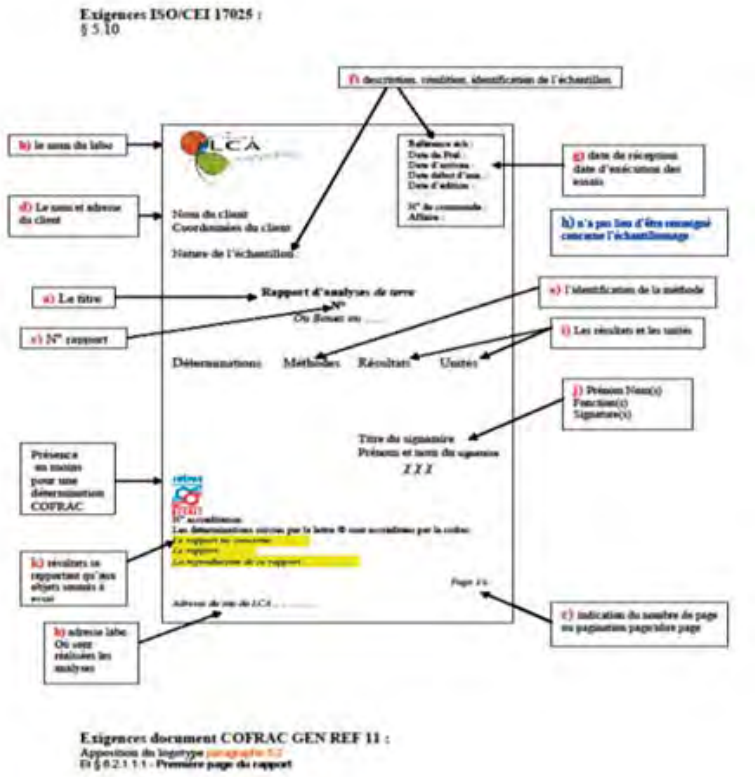
> Des informations sur l'échantillon : description, nature, identification, date de réception, date et lieu de prélèvement …

> Des informations sur les conditions d'analyse : date de début des analyses, méthode, écarts par rapport aux normes, …

> Des informations sur les résultats : unités …

> Des informations sur les portées d'accréditation, incertitudes de mesure, unicité et nombre de pages du rapport, qualité du signataire …

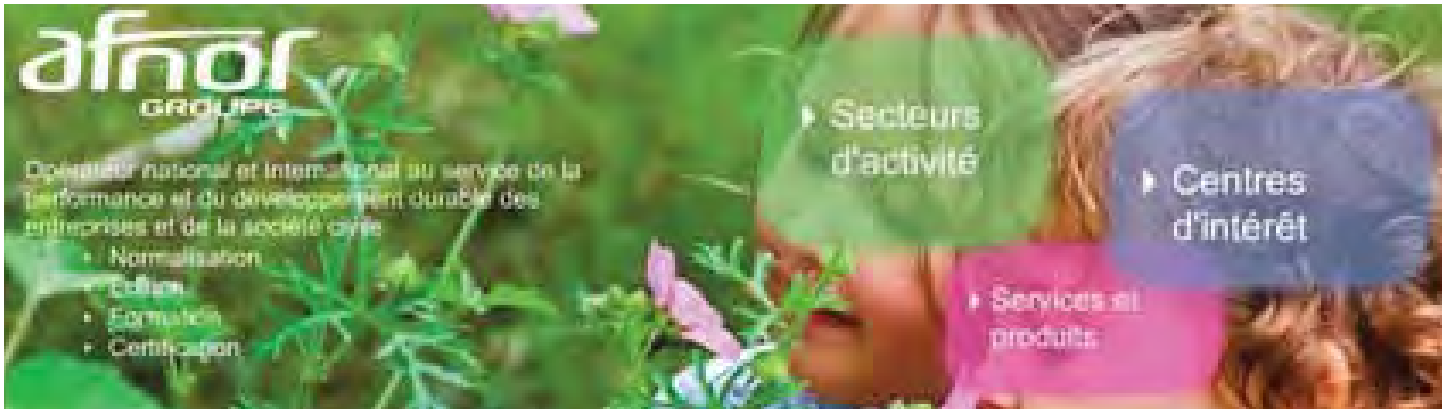
L'illustration suivante, extraite de la procédure d'élaboration ou de modification des rapports d'analyses du LCA, présente les points qui doivent figurer sur un rapport sous accréditation COFRAC (points de «a» à «k») pour répondre aux exigences de la norme NF EN ISO/CEI 17025.




*En proposant une nouvelle gamme de rapports interactifs, baptisée WikiReport, le LCA réinvente le rapport d'analyses. Les rapports d'analyses de boues, premier produit de la gamme à voir le jour, sont, sur le papier, des rapports d'analyses traditionnels qui répondent aux besoins analytiques, réglementaires et aux exigences du Cofrac. Mais alors que les rapports "classiques" ( format papier, pdf, …) sont limités en contenus par leur format (A3, A4, double page), WikiReport est un rapport PDF dynamique. Dans les données du rapport, sont encapsulés des liens vers des bases de connaissance : le portail agronomique WIKILCA, les articles d'AgroReporter traitant du sujet, les incertitudes de mesure du laboratoire ou vers des sites d'informations spécifiques.*

# AFNOR Mode d'emploi

*Publié le 4 novembre 2010*




NF EN…, NF X…, NF ISO… sont des sigles qui, complétés d'un numéro, désignent des normes auxquelles nous nous référons quotidiennement. Elles sont la preuve indiscutable par exemple qu'un produit est conforme à des caractéristiques de sécurité et/ou de qualité définies dans un référentiel de certification donné. L'application des normes en vigueur par un fournisseur apporte donc une garantie à l'utilisateur d'un bien.

En France, ces normes sont élaborées au sein de l'AFNOR : Agence Française de NORmalisation. Les domaines de compétences de cette structure, créée en 1926, sont l'édition, la formation, la certification et enfin, la normalisation.

L'AFNOR a pour mission de rassembler les acteurs économiques et sociaux concernés par un sujet donné, afin qu'ils produisent, de façon consensuelle, des documents de références : les normes. Ces dernières fixent des règles, des caractéristiques, des recommandations, des bonnes pratiques allant dans l'intérêt des acteurs concernés. Elles sont applicables à tout produit, service, méthode ou processus

Dans notre domaine d'activité, les normes auxquelles nous sommes fréquemment confrontés portent sur les méthodes d'analyses, ainsi que sur les produits que nous analysons (NF U 44-051…).

En tant qu'acteur incontournable dans le secteur de l'agro-environnement, le Laboratoire LCA participe depuis de nombreuses années à différents groupes de travail de l'AFNOR, et donc au processus de normalisation.

Qu'il s'agisse de microbiologie (Eric ORY), d'amendements organiques (Marie-Laure GUILLOTIN & Marie-Elisabeth DESPONT), de supports de cultures (Marie-Claire PAJOT), ou encore de méthanisation (Marie-Laure GUILLOTIN), l'équipe du LCA est à la pointe des dernières avancées et met à votre disposition tout son savoir faire et son expertise pour vous garantir des prestations de qualité.

# DANS RECLAMATION IL Y A RELATION

*Publié le 24 mars 2011*

Toute relation commerciale entre deux partenaires peut engendrer des litiges de diverses natures. Au LCA nous employons le terme de " réclamations clients ". Pour un laboratoire d'analyses, les réclamations concernent le plus souvent les résultats analytiques, la retranscription de la référence de l'échantillon ou les montants facturés. Au LCA, toutes les réclamations sont enregistrées. Sur 106 000 échantillons analysés en 2010 au laboratoire, 198 ont fait l'objet d'une réclamation client de nature analytique, n'ayant donné lieu à la ré-édition d'un rapport d'analyse que dans 0,1 % des cas. Dans cette même année, 551 réclamations d'autre nature ont été ouvertes. Ces chiffres traduisent notre souci d'enregistrer et de répondre à toutes les remarques de nos clients. Appliquant le Principe d'Amélioration Continue du système de management de la qualité, le LCA a mis en place cette gestion des réclamations depuis plusieurs années. Son fonctionnement a été récemment informatisé, permettant de faciliter la centralisation de vos demandes et d'en optimiser le traitement.

## CAHIER DES CHARGES

Toute personne du LCA en contact avec les clients est susceptible de recueillir des remarques concernant un dossier. Le nouveau système de gestion des réclamations est donc conçu pour être un outil de communication. Il est accessible aux secrétaires techniques et commerciales, aux commerciaux, au service de réception des échantillons, aux agronomes et aux responsables techniques de nos laboratoires. Toute nouvelle réclamation, même ouverte à distance par les commerciaux, est immédiatement transmise au service concerné dans chaque site du LCA. Les réclamations ouvertes et leur statut (en cours de traitement, clôturé …) sont visibles par toutes les personnes ayant accès au système. Toutes les actions mises en œuvre dans le traitement de la réclamation sont enregistrées et consultables en interne. Cette souplesse nous permet de gagner en réactivité et nous rapproche de la préoccupation du client.

## RÉPONSE AU CLIENT

Lorsque la réclamation est clôturée, c'est-à-dire lorsque le dernier intervenant du laboratoire a apporté une action finale au dossier

(édition d'avoir, réédition de facture, résultat de la contre-analyse…), les nouvelles pièces sont envoyées au client. Si le laboratoire a renouvelé l'analyse de l'échantillon, le résultat de ce contrôle est transmis par courrier, et expliqué dans une lettre indiquant aussi la référence de la réclamation

## POUR LE LABORATOIRE

La gestion est simplifiée pour le laboratoire. D'un point de vue environnemental, c'est aussi moins de papier. Enfin, la centralisation de l'information facilite l'identification de pistes d'amélioration de nos performances, en terme analytique bien sûr, mais aussi de service. Tout cela répond parfaitement aux prescriptions de la norme NF EN ISO 17025[i], qui encadre la délivrance de l'accréditation par le Comité Français d'Accréditation (Cofrac). Elle exige du laboratoire d' « avoir une politique et une procédure pour traiter les réclamations provenant des clients ou d'autres parties. Il doit conserver des enregistrements de toutes les réclamations ainsi que des examens et actions correctives qu'il a prises ».
Grâce à cet outil, le LCA est en mesure de vous garantir une réponse rapide et de qualité. Ce fonctionnement doit permettre d'identifier les pistes d'amélioration de toute nature (nouveaux services à développer etc…) et de répondre à notre souci de satisfaire nos clients.

*[i] NF EN ISO/CEI 17025 (2005) : Exigences générales concernant la compétence des laboratoires d'étalonnages et d'essais.*

# LE CRÉDIT IMPOT RECHERCHE

*Publié le 3 février 2011*

LCA est officiellement agréé depuis le 11 janvier 2011 par le Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche pour faire bénéficier à ses clients du Crédit Impôt Recherche (CIR) sur leurs projets de recherche et développement.
Cet agrément est accordé pour les années 2010 et 2011 et 2012.

## QU'EST-CE QUE CELA VOUS APPORTE ?

Vous faites de la recherche et développement au sein de votre entreprise ! Vous savez donc que vos dépenses relatives à des opérations de R&D confiées à des prestataires extérieurs sont éligibles au CIR sous réserve qu'ils soient agréés (art 244 quater B II d, d bis et d ter du code général des impôts).

Ainsi, en confiant désormais les analyses prévues dans vos opérations de R&D à LCA, nous vous permettons de faire figurer la totalité du montant de ces dépenses dans le calcul de votre assiette du CIR (montant hors taxes).

Le CIR est calculé sur la base de toutes les dépenses de recherche & développement effectuées par votre entreprise : elles concernent essentiellement des dépenses relatives aux moyens humains et matériels affectés à la R&D, à la recherche sous-traitée, ainsi qu'à la veille technologique, à la prise et à la défense de brevets.

Le CIR est octroyé sous forme d'une réduction d'impôt sur les sociétés ou de crédit d'impôt. A compter de janvier 2008, le Crédit d'Impôt Recherche (CIR) est égal à 30 % des dépenses éligibles à ce dispositif pour la tranche inférieure à 100 millions d'euros et 5% des dépenses de la tranche supérieure.

*La liste des sociétés agréées sera mise à jour prochainement par le Ministère de l'enseignement supérieur sur le site Internet : www.enseignementsup-recherche.gouv.fr*